



Universidad
de Cádiz

Escuela Superior
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL
TEXTURIZADO LÁSER EN LAS
PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LA
ALEACIÓN DE ALUMINIO UNS A92024**

AUTOR: GUZMÁN DOMÍNGUEZ DOMÍNGUEZ

Puerto Real, septiembre 2020



UCA

Universidad
de Cádiz

Escuela Superior
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL
TEXTURIZADO LÁSER EN LAS
PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LA
ALEACIÓN DE ALUMINIO UNS A92024**

DIRECTORES: JORGE SALGUERO GÓMEZ
JUAN MANUEL VÁZQUEZ MARTÍNEZ
AUTOR: GUZMÁN DOMÍNGUEZ DOMÍNGUEZ

Puerto Real, septiembre 2020

AGRADECIMIENTOS

- A mis tutores, el Dr. D. Jorge Salguero Gómez y el Dr. D. Juan Manuel Vázquez Martínez, por ofrecerme la posibilidad de trabajar en esta línea de investigación y por su inestimable apoyo.
- Al Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial y al grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (TEP-027), por permitirme usar sus instalaciones y equipos para la realización de la fase experimental.
- A la Delegación de Estudiantes de la ESI y a todas las personas con las que he trabajado en ejercicio de la representación estudiantil, por el aporte formativo y las competencias transversales adquiridas.
- A mis padres, Rosa y Rafael, a mis abuelos, Rosa y Manolo, y a mis amigos más cercanos, por su inestimable apoyo durante mi estancia en la universidad.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Aproximación al Estado del Arte	1
1.1 Introducción	1
1.2 Aleaciones de aluminio	1
1.2.1 Mecanismos de endurecimiento.....	3
1.2.2 Aleaciones de aluminio para forja.....	3
1.2.3 Aleaciones de aluminio para fundición	6
1.2.4 Aleación UNS A92024.....	7
1.3. Fricción y desgaste	8
1.3.1 Fricción	8
1.3.2 Desgaste	12
1.4 Lubricación	16
1.4.1 Viscosidad de los lubricantes	17
1.4.2 Regímenes de lubricación	18
1.4.3 Parámetro de película	19
1.4.4 Curva de Stribeck.....	19
1.4.5 Mojabilidad	20
1.5 Mecanizado láser	22
1.5.1 Principio de funcionamiento del láser	24
1.5.2 Mecanismo de eliminación de material.....	25
1.5.3 Tipos de láser.....	26
1.5.4 Parámetros tecnológicos.....	27
1.6 Texturizado láser	29
1.6.1 Efecto en la mojabilidad.....	30
1.6.2 Efecto en la lubricación marginal	31
1.6.3 Efecto en la lubricación parcial, elastohidrodinámica e hidrodinámica	32
Capítulo 2: Metodología experimental	39
2.1 Introducción	39
2.2 Preparación de probetas.....	39
2.3 Texturizado de las probetas	41
2.4 Ensayos pin-on-disc e inspección de los pines y los discs	43
Capítulo 3: Resultados y Discusión.....	46
3.1 Introducción	46
3.2 Rugosidad de las probetas	46

3.3 Coeficiente de fricción.....	48
3.4 Desgaste	51
3.4.1 Desgaste en los pines	51
3.4.2 Desgaste en los discs	52
3.5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras	55
Capítulo 4: Referencias bibliográficas	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: composición de los distintos aviones fabricados por Boeing.....	8
Figura 1.2: fuerzas que dan lugar a la fricción	9
Figura 1.3: aspereza cónica ideal	10
Figura 1.4: Variación del estado tensional en una aspereza idealizada tras la aplicación de una fuerza horizontal. a) antes de aplicar la fuerza, b) después de aplicarla.....	11
Figura 1.5: esquema del proceso del desgaste adhesivo.....	13
Figura 1.6: desprendimiento de material debido al desgaste adhesivo	14
Figura 1.7: esquema del desgaste abrasivo	15
Figura 1.8: variación del espesor de la capa adherido de aluminio y del desgaste en un par acero-aluminio con la temperatura.....	16
Figura 1.9: Definición de la viscosidad	17
Figura 1.10: Curva de Stribeck.....	20
Figura 1.11: Gotas de líquido y sus ángulos de contacto según el modelo de Young	21
Figura 1.12: Influencia de la rugosidad en el ángulo de contacto	22
Figura 1.13: Proceso de mecanizado láser	24
Figura 1.14: principio de funcionamiento de la emisión estimulada.....	25
Figura 1.15: esquema de funcionamiento de un láser de Nd:YAG	26
Figura 1.16: efectos del láser sobre la superficie.....	27
Figura 1.17: diferentes geometrías de texturas. a) dimples, b) líneas cruzadas, c) circunferenciais, d) líneas paralelas.....	30
Figura 1.18: coeficiente de fricción promedio obtenido por Galda et Al	31
Figura 1.19: coeficiente de fricción en los ensayos de Kovalchenko et Al.....	33
Figura 1.20: curva de Stribeck de los ensayos de Kovalchenko et Al.....	34
Figura 1.21: curva de Stribeck de los experimentos de Galda et Al.....	35
Figura 1.22: texturas de los experimentos de Galda et. al.....	36
Figura 1.23: distribución asimétrica de presiones	36
Figura 2.1: diagrama de flujo del procedimiento experimental	39
Figura 2.2: a) Prensa automática Struers LaboPress -3. b) Probetas antes de la embutición	40
Figura 2.3: Pulidora Struers TegraPol-11	40
Figura 2.4: verificación de la rugosidad de las probetas	41
Figura 2.5: grabadora láser Rofin EasyMark.....	42
Figura 2.6: texturas empleadas. a) circular 0,8 mm; b) circular 1 mm; c) lineal 0,8 mm; d) lineal 1 mm	42
Figura 2.7: fotografías de las texturas. a) circular 0,8 mm, b) circular 1 mm, c) lineal 0,8 mm, d) lineal 1 mm.....	43
Figura 2.8: Tribómetro Microtest MT/60/NI (arriba). Detalle del ensayo (abajo)	44
Figura 2.9: Microscopio Nikon SMZ800 y balanza electrónica Ohaus Pioneer PA214	44
Figura 3.1: Ra de las probetas	47
Figura 3.2: Rz de las probetas	47
Figura 3.3: perfil R de la probeta N° 10.....	48
Figura 3.4: coeficiente de fricción promedio	49
Figura 3.5: variación de masa (en gramos) promedio en los pines.....	51
Figura 3.6: pines con material adherido. a) probeta N° 2, b) probeta N° 11, c) probeta N° 12, d) probeta N° 15	52

Figura 3.7: volumen del surco de desgaste en los discs.....	53
Figura 3.8: fotografías de las probetas tras los ensayos. a) lineal 0,8 mm, b) lineal 1 mm, c) circular 0,8 mm, d) circular 1 mm, e) sin texturizar	54
Figura 3.9: evolución del coeficiente de fricción en seco en probetas texturizadas (arriba) y no texturizadas (abajo).....	56
Figura 3.10: evolución del coeficiente de fricción lubricado en probetas texturizadas (arriba) y no texturizadas (abajo)	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: series de aleaciones de aluminio.....	2
Tabla 1.2: series de aleaciones de aluminio de forja y de fundición	3
Tabla 1.3: codificación alfanumérica del estado de endurecimiento de las aleaciones de aluminio	4
Tabla 1.4: composición química de la aleación A92024	7
Tabla 1.5: propiedades de la aleación A92024	8
Tabla 1.6: tipos de láser más comunes	28
Tabla 2.1: parámetros del texturizado láser	42
Tabla 2.2: geometría de las texturas grabadas en las probetas.....	42
Tabla 2.3: parámetros de los ensayos pin-on-disc	43
Tabla 3.1: parámetros de rugosidad de las probetas.....	46
Tabla 3.2: coeficiente de fricción promedio	49
Tabla 3.3: variación de masa (en gramos) en los pines.....	51
Tabla 3.4: volumen del surco de desgaste en los discs	53

Capítulo 1: Aproximación al Estado del Arte

1.1 Introducción

En el campo del diseño mecánico, la selección de materiales adecuados goza de gran importancia. A menudo se requiere el empleo de piezas resistentes a esfuerzos, al desgaste, a la corrosión y las distintas condiciones adversas que puedan aparecer desde el punto de vista de su buen comportamiento en servicio.

En muchas ocasiones, la selección de un material que cumpla con todos sus requerimientos y que garanticen una fiabilidad y un buen rendimiento funcional necesita una gran inversión en el uso de materiales especiales, o de una reducción de las prestaciones de los componentes fabricados. Para paliar esta situación, una posibilidad es la de la optimización de las propiedades de materiales mediante diversas técnicas ya existentes en el mercado, para mejorar sus cualidades.

En este Trabajo Fin de Grado se presenta una técnica encaminada a mejorar el comportamiento tribológico de la aleación de aluminio UNS A92024. Esta aleación, como se expondrá a continuación, tiene un gran campo de aplicación en la industria aeroespacial como material estructural, sin embargo, su uso en aplicaciones tribológicas está limitado por su dureza relativamente baja y su elevada tasa de desgaste. El texturizado láser ha demostrado ser un proceso apto para la mejora del coeficiente de fricción y del desgaste en otras aleaciones, tanto en condiciones secas como lubricadas.

Por ende, el principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es conseguir una optimización de las propiedades tribológicas de la aleación UNS A92024 mediante la técnica del texturizado láser, con el fin de emplearla en componentes de máquinas sometidos a fricción.

1.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio y sus aleaciones gozan de un gran interés en la industria. Esto se debe a su buena resistencia con relación a su peso, a su ligereza (su densidad es, aproximadamente, un tercio la del acero y del cobre) y a su resistencia a la corrosión. Además es buen conductor térmico y eléctrico, buen reflector de luz, no es magnético ni tóxico, fácil de ensamblar, estéticamente atractivo, relativamente económico y fácil de conformar [1–5]. Además, se trata de un material que puede ser aleado con una gran cantidad de elementos, lo que le confiere un abanico de propiedades muy amplio. Es el tercer material más abundante en la corteza terrestre, y el metal más abundante [6]. Otra característica del aluminio es su buena respuesta a los procesos de endurecimiento, que le permiten obtener durezas hasta treinta veces superiores a las del aluminio puro; siendo comparable en algunos casos a la de aceros de bajo contenido en carbono. Por estas razones, es un material casi imprescindible en la vida cotidiana. En el ámbito industrial, destaca sus usos en la industria automovilística y aeroespacial, así como en la fabricación de cables para aplicaciones con alto voltaje [4,5] y en la fabricación de envases para alimentos y bebidas [6].

Una de las grandes ventajas que plantea el aluminio en el panorama actual y futuro, además de las propiedades anteriormente mencionadas, es su reciclabilidad. El consumo energético en el

proceso del reciclaje del aluminio está en torno al 5% del necesario para obtenerlo a partir de la alúmina. Además, un 70% del total de aluminio fabricado en la historia se sigue utilizando [6].

Últimamente, se está tendiendo a su sustitución por materiales compuestos o aleaciones de titanio y níquel, que ofrecen una resistencia con relación a su peso aún mayor que las de las aleaciones de aluminio. Sin embargo, la industria sigue empleando aleaciones de aluminio debido a que es, en comparación, más fácil y rápido de conformar que dichos materiales y al gran conocimiento que se tiene sobre ellas.

Las aleaciones de aluminio se clasifican en dos grandes grupos: aleaciones para forja y para fundición, aunque también se puede emplear en procesos pulvimetalúrgicos [5]. Las aleaciones para forja tienen una microestructura considerablemente diferentes que las de fundición, para adecuarse a las diferencias entre los procesos de fabricación [6]. Para denominar estas aleaciones tradicionalmente se ha empleado el sistema de numeración de la *Aluminium Association*. En la Tabla 1.1 se aprecia la designación de las aleaciones según este sistema.

Tabla 1.1: series de aleaciones de aluminio [5]

Aleaciones de forja		Aleaciones de fundición	
Serie	Principal aleante	Serie	Principal aleante
1xxx	Aluminio puro (>99% Al)	1xx.x	Aluminio puro (>99% Al)
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganeso	3xx.x	Silicio, cobre y/o manganeso
4xxx	Silicio	4xx.x	Silicio
5xxx	Magnesio	5xx.x	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio	6xx.x	<i>Serie no utilizada</i>
7xxx	Zinc	7xx.x	Zinc
8xxx	Otros aleantes	8xx.x	Estaño

En las aleaciones para forja, el primer dígito indica el principal aleante, y el segundo las modificaciones de la aleación. El tercer y cuarto dígito solo tienen significancia identificativa. En el caso de la serie 1xxx el tercer y cuarto dígito indican el contenido mínimo de aluminio puro (por ejemplo, 1090 indica una pureza mínima del 99,90% de Al). En la caso de las aleaciones para fundición, el primer dígito indica el aleante principal, el segundo y tercer dígito indican el porcentaje mínimo de Al (al igual que el tercer y cuarto dígito en las aleaciones de la serie 1xxx) y el cuarto dígito indica la forma en la que se suministra el producto [5].

En la actualidad, el sistema mayormente empleado es el *Unified Numbering System*, de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y la SAE (*Society of Automotive Engineers*). Este sistema trata de estandarizar la nomenclatura de todos los materiales. En el caso de las aleaciones de aluminio, se emplea un código alfanumérico de seis dígitos. Comienza por la letra «A» (C para el cobre, N para el níquel, P para metales preciosos y Z para zinc) seguido de un «0» para las aleaciones de fundición o un «9» para las de forja, y los cuatro dígitos propios del sistema de numeración de la *Aluminium Association*. Por ejemplo, la aleación AA 2024 pasaría a denominarse A92024.

1.2.1 Mecanismos de endurecimiento

Como se ha mencionado anteriormente, las aleaciones de aluminio son susceptibles de ser endurecidas. Los métodos de endurecimiento más comunes en las aleaciones de aluminio son el endurecimiento por deformación, por solución sólida y por precipitación. En función de los tratamientos que puedan ser aplicados, podemos subclasificar las aleaciones de aluminio de la siguiente forma:

Tabla 1.2: series de aleaciones de aluminio de forja y de fundición [6]

Aleaciones de forja		Aleaciones de fundición	
Serie	Mecanismo de endurecimiento	Serie	Mecanismo de endurecimiento
1xxx	No tratable térmicamente	1xx.x	No tratable térmicamente
2xxx	Tratable térmicamente	2xx.x	Tratable térmicamente
3xxx	No tratable térmicamente	3xx.x	Algunas son tratables térmicamente
4xxx	No tratable térmicamente	4xx.x	No tratable térmicamente
5xxx	No tratable térmicamente	5xx.x	No tratable térmicamente
6xxx	Tratable térmicamente	6xx.x	<i>Serie no utilizada</i>
7xxx	Tratable térmicamente	7xx.x	Tratable térmicamente
8xxx	Tratable térmicamente	8xx.x	Tratable térmicamente

Las aleaciones de aluminio pueden endurecer por deformación plástica (acritud), por solución sólida o por precipitación. El control del tamaño del grano también puede actuar como mecanismo de endurecimiento. La solubilidad de los aleantes en aluminio a temperatura ambiente es limitada, por lo tanto, el mecanismo de endurecimiento por solución sólida necesita estar respaldado por otro proceso endurecedor. Las aleaciones tratables térmicamente, generalmente endurecen por precipitación pudiendo ser acompañada de acritud o solución sólida. Para ello, se somete a la aleación a unos ciclos de calentamiento y enfriamiento controlados, en los que se persigue disolver los precipitados, enfriar súbitamente la aleación hasta conseguir un estado metaestable, y posteriormente calentar hasta volver a precipitar, de forma controlada, dichos microconstituyentes. Estas aleaciones ofrecen las mayores prestaciones para este material. Las aleaciones no tratables térmicamente, generalmente endurecen por deformación plástica [6,7].

El estado de endurecimiento se designa empleando una codificación alfanumérica. En el caso de las aleaciones de forja, dicha codificación se añade tras la denominación de la aleación. La codificación se encuentra en la Tabla 1.3.

1.2.2 Aleaciones de aluminio para forja

Las aleaciones de aluminio para forja se caracterizan por tener una microestructura formada principalmente por una solución sólida de aleantes en la matriz de aluminio. También conviven otras fases, como compuestos intermetálicos, precipitados y dispersoides. Las fases intermetálicas son perjudiciales para la aleación debido a su bajo punto de fusión, cuando contienen Fe o Si. Los precipitados y dispersoides son fases, que se pueden formar durante el tratamiento térmico, que contribuyen a endurecer la aleación, actúan como antirrecristalizante y homogenizan la deformación plástica [7].

Tabla 1.3: codificación alfanumérica del estado de endurecimiento de las aleaciones de aluminio [6]

Letra	Descripción
F	Como se ha fabricado (sin tratamiento específico)
O	Recocida (estado más blando posible)
H	Endurecida por deformación <ul style="list-style-type: none"> • H1x: trabajada en frío (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío) • H2x: trabajada en frío y parcialmente recocida • H3x: trabajada en frío y estabilizada a baja temperatura para impedir el endurecimiento por precipitación
W	Endurecida por solución sólida
T	Endurecida por precipitación <ul style="list-style-type: none"> • T1: enfriada desde la temperatura de fabricación y madurada naturalmente. • T2: enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y madurada naturalmente. • T3: endurecida por solución sólida, trabajada en frío y madurada naturalmente. • T4: endurecida por solución sólida y madurada naturalmente. • T5: enfriada desde la temperatura de fabricación y madurada artificialmente. • T6: endurecida por solución sólida y madurada artificialmente. • T7: endurecida por solución sólida y estabilizada por exceso de maduración. • T8: endurecida por solución sólida, trabajada en frío y envejecida artificialmente. • T9: endurecida por solución sólida, envejecida artificialmente y trabajada en frío. • T10: enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

A continuación, se describen las principales características de las distintas series de aleaciones de aluminio para forja [4,7]:

Serie 1xxx: se trata de aluminio con un nivel de pureza superior al 99,00%. Tiene una excelente resistencia a la corrosión, gracias a la formación de una capa pasivadora de alúmina de unos nanómetros de espesor. También tiene una gran conductividad térmica y eléctrica y una gran maleabilidad. No es tratable térmicamente, pero puede ser endurecida mediante deformación plástica.

Serie 2xxx: también se conocen como *duraluminos*. Su principal aleante es el cobre, aunque también se le añade Mn, Mg y Si para aumentar su resistencia. Responde al tratamiento térmico, ya que el cobre forma precipitados endurecedores. Los tratamientos térmicos elevan la tensión de fluencia, dando lugar a aleaciones con unas propiedades mecánicas óptimas comparables a la de aceros de bajo contenido en carbono. El Mg y el Si contribuyen a la formación de estos precipitados, aunque la formación de compuestos intermetálicos con Si y Fe puede empeorar la tenacidad. Los precipitados de cobre también empeoran la resistencia a la corrosión, por lo tanto, para su empleo en ambientes corrosivos es necesario recurrir a tratamientos como el de *plaqueado*, en el que se recubre con aleaciones de la serie 1xxx o 6xxx. A estas aleaciones, otros aleantes como el Ti, Zr y V actúan refinando el grano y por lo tanto aumentando su resistencia. Su principal campo de aplicación es en la fabricación de

remaches y elementos estructurales para la industria aeronáutica, y en cualquier aplicación que requiera buena resistencia mecánica por encima de 150°C.

Serie 3xxx: su principal aleante es el manganeso. Su solubilidad es limitada, aunque la adición de una cantidad comprendida entre un 1-1,5% mejora la resistencia mecánica y mantiene un excelente comportamiento a la corrosión y una alta ductilidad. También aparecen dispersoides de manganeso que endurecen la aleación. Su principal campo de aplicación es en la industria alimentaria, para la fabricación de latas de bebidas.

Serie 4xxx: su principal aleante es el silicio, que es capaz de disminuir el punto de fusión de la aleación sin producir fragilidad de esta. Poseen una excelente soldabilidad, y su principal campo de aplicación es para la unión de otros componentes de aluminio. Generalmente no son tratables térmicamente, pero al soldarse absorben parte de los aleantes de la otra aleación, pudiendo responder también al tratamiento térmico. Si tienen grandes cantidades de silicio (en torno al 12%) adquieren un color oscuro que les ofrece un gran campo de aplicación en arquitectura. Es preciso mencionar a la aleación A94032, que posee una gran resistencia al desgaste y bajo coeficiente de expansión térmica, lo que la convierte en una buena elección para la fabricación de pistones de motores de Al.

Serie 5xxx: en estas aleaciones el principal aleante es el magnesio. A pesar de su gran solubilidad a altas temperaturas, el magnesio forma precipitados poco endurecedores por lo que no responde al tratamiento térmico. No obstante, la solución sólida de magnesio le confiere una gran resistencia a la corrosión, lo cual es una serie idónea para su uso en ambientes marinos, criogénicos y en la industria química.

Serie 6xxx: son aleaciones con unas propiedades intermedias. Ofrecen una resistencia aceptable a la vez que una buena forjabilidad y facilidad de extrusión, buena soldabilidad y buen comportamiento frente a la corrosión. Responden al tratamiento térmico, sin embargo, es necesario el empleo de maduración artificial. Se le puede agregar aleantes como el Pb y el Bi para mejorar su maquinabilidad. Su principal campo de aplicación es en el sector de la carpintería metálica (fabricación de ventanas, puertas...) y en arquitectura.

Serie 7xxx: en estas aleaciones, es necesario añadir Mg como aleante secundario para producir la precipitación. Generalmente se les añade otros aleantes como el Cu, Cr, Zr y Mn, para mejorar su dureza mediante la formación de dispersoides y precipitados. Tienen buena soldabilidad, y con la adición de cobre en estado T6 se pueden conseguir altísimos valores de límite elástico y resistencia. Sin embargo, su susceptibilidad a la corrosión bajo tensiones limita su campo de aplicación. Se emplean en la construcción de estructuras aeronáuticas, aunque se necesita la aplicación de tratamientos térmicos especiales para mejorar su tenacidad y resistencia a la corrosión bajo tensiones.

Serie 8xxx: en esta serie se enmarcan una gran cantidad de aleaciones, principalmente de interés en el sector aeroespacial. Destacan las aleaciones Al-Li, que presentan un gran módulo elástico junto a una menor densidad que las aleaciones convencionales, y unas propiedades mecánicas similares a las de la serie 2xxx y 7xxx. No obstante, su coste es muy alto debido a que presentan dificultades en su conformado. Se emplean en la fabricación de tanques de combustible en transbordadores espaciales.

También hay que mencionar aleaciones con elementos como el Ca, Ni y Fe, que se emplean en aplicaciones que requieran una alta resistencia a elevadas temperaturas y presiones. También hay que destacar aleaciones superplásticas, y algunas que contienen Sc, Y y Nb, con aplicación en la industria militar.

1.2.3 Aleaciones de aluminio para fundición

El aluminio y sus aleaciones, en líneas generales, son las más versátiles en cuanto a fundición se refiere debido a su facilidad para conseguir buenos resultados [8]. En estas aleaciones se requieren bajos puntos de fusión, buena fluidez y facilidad de moldeo. Para ello, se le añade cantidades suficientes de silicio (en cantidades superiores a la de las aleaciones para forja), bien como aleante principal o secundario. Su microestructura consiste en placas de silicio insertadas en la matriz de Al. Generalmente, se le aplican tratamientos de endurecimiento por acritud, aunque en función de su composición pueden existir precipitados y dispersoides que actúen como endurecedores. El empleo de aleantes como B, Ti y P permite optimizar la microestructura y refinar el grano. Las aleaciones para fundición más usadas son las de la serie 3xx.x y 4xx.x debido a su buena moldeabilidad. Las de la serie 4xx.x son tratables térmicamente, lo que le confiere mejores propiedades mecánicas. [6,7].

A continuación, se describen las principales características de las diferentes aleaciones para fundición [8]:

Serie 1xx.x: sus propiedades son similares a las de las aleaciones de forja. Poseen una excelente resistencia a la corrosión, así como buena conductividad térmica y eléctrica.

Serie 2xx.x: estas aleaciones, al igual que las aleaciones de forja, son tratables térmicamente, poseen una alta resistencia mecánica y baja resistencia a la corrosión. Sin embargo, su fluidez es escasa en comparación con otras aleaciones de aluminio. Cuando se realizan fundiciones en moldes permanentes, además se requieren procedimientos especiales para aliviar tensiones residuales. Su uso es escaso debido a estos inconvenientes mencionados, sin embargo, su resistencia mecánica a alta temperatura y resistencia al desgaste relativamente alta le confiere aplicación en la fabricación de componentes de motores de combustión interna.

Serie 3xx.x: se trata de las aleaciones de moldeo más usadas. El cobre le confiere buenas propiedades mecánicas, mientras que el silicio mejora su fluidez. En función de la complejidad de geometría del producto a fabricar, se emplean diferentes cantidades de silicio. Altos contenidos en silicio le confieren a la aleación una buena resistencia al desgaste y un bajo coeficiente de expansión térmica, lo cual permite usarlas en la fabricación de componentes de motores de combustión interna.

Serie 4xx.x: esta familia de aleaciones es la que posee la mejor capacidad de ser moldeadas. Generalmente, para aumentar su resistencia y dureza, se le añade magnesio como aleante secundario, lo cual hace que se convierta en una aleación tratable térmicamente.

Serie 5xx.x: en estas aleaciones, el aleante principal es el magnesio. Poseen una moderada resistencia con relación a su peso, pero poseen una excelente resistencia a la corrosión en ambientes marinos. También tienen buena soldabilidad y son usadas en usos arquitectónicos o decorativos. Poseen también, buena maquinabilidad. Sin

embargo, es más costoso realizar fundiciones con esta familia de aleaciones y es necesario controlar los gradientes de temperatura. Durante el proceso, el magnesio tiende a oxidarse, lo cual incrementa los costes de este proceso.

Serie 7xx.x: las aleaciones de estas series generalmente emplean magnesio como aleante secundario. Son tratables térmicamente, y son capaces de madurar naturalmente tras unos 30 días después de la solidificación (aunque puede acelerarse empleando maduración artificial). En estas aleaciones, la velocidad de enfriamiento es crucial, ya que las secciones más delgadas (con una velocidad de enfriamiento mayor) pueden requerir tratamientos endurecedores adicionales, debido a la segregación de las fases dispersas. Estas aleaciones tienen unas buenas propiedades mecánicas junto con una buena maquinabilidad y alta resistencia a la corrosión. No obstante, su nivel de fluidez es bajo y se requiere un buen control del proceso de fundición para prevenir la aparición de defectos (como grietas).

Serie 8xx.x: estas aleaciones tienen un gran campo de aplicación en la fabricación de rodamientos, debido a su resistencia al desgaste, a la corrosión y a la fatiga. Sin embargo, para que las piezas fabricadas tengan un buen rendimiento funcional, se necesita una microestructura muy específica (consistente en pequeñas distribuciones de estaño entre las dendritas). Para ello es necesario un control exhaustivo del proceso de fundición, con enfriamientos rápidos difíciles de conseguir debido al bajo punto de fusión del estaño respecto al del aluminio (650 °C frente a 229 °C).

1.2.4 Aleación UNS A92024

Esta aleación pertenece a la serie 2xxx, por lo que tiene cobre como aleante principal y magnesio como aleante secundario. Es susceptible al tratamiento térmico, y se suele emplear en estado T3 (endurecida por precipitación mediante maduración natural). Se puede suministrar en forma de chapas, tubos esturados en fríos, alambre, varillas y perfiles. En la Tabla 1.4 y en la

Tabla 1.5, figuran las propiedades más importantes de esta aleación [4,8].

La aleación UNS A92024 es una de las aleaciones de aluminio más empleada en la construcción del fuselaje de aeronaves. La mayor parte de sus aplicaciones se encuentran en este sector. Tiene un límite elástico moderado en comparación con otras aleaciones, pero posee una densidad relativamente baja, buena relación entre su resistencia y su peso, y muy buena resistencia a la fractura y al daño, sobre todo en estado de temple T3. También destaca por su resistencia a la corrosión. Estas propiedades hacen que esta aleación sea idónea para aplicaciones que requieran la fabricación de componentes ligeros y fiables bajo esfuerzos moderados [9,10].

Tabla 1.4: composición química de la aleación A92024

Composición Química (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Al
									Cada	Total	
Nominal	-	-	4,35	0,6	1,5	-	-	-	-	-	Resto
Tolerancias	<0,50	<0,50	±0,55	±0,30	±0,30	<0,10	<0,25	<0,15	<0,05	<0,15	

Tabla 1.5: propiedades de la aleación A92024

Propiedad		Valor
Densidad (g/cm ³)		2,77
Temperatura (°C)	Liquidus	683
	Solidus	502
Calor específico (J/Kg·K)		875
Conductividad térmica (W/m·K)		120
Coeficiente de dilatación térmica por °C		23·10 ⁻⁶
Conductividad eléctrica (% IACS)		30
Resistividad eléctrica (nΩ·m)		57
Módulo elástico (GPa)		73,55
Límite elástico en estado T3 (MPa)		345
Resistencia a la tracción en estado T3 (MPa)		483

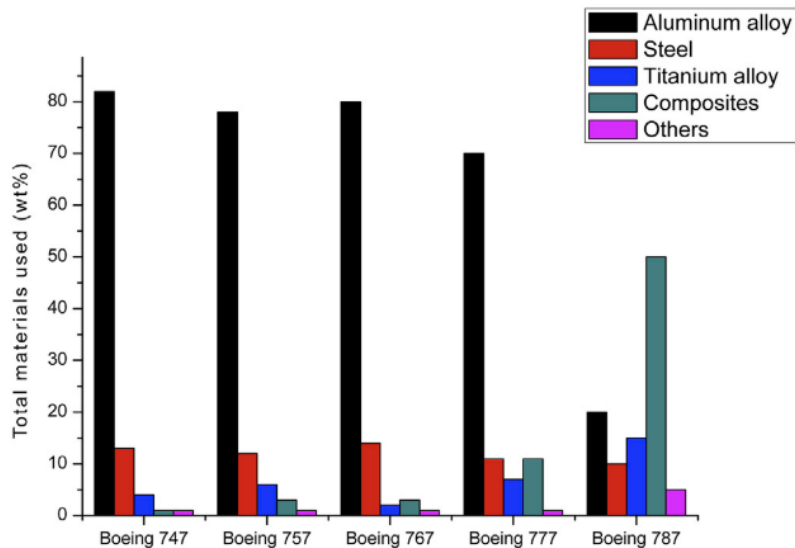


Figura 1.1: composición de los distintos aviones fabricados por Boeing [9]

1.3. Fricción y desgaste

1.3.1 Fricción

La fricción es un fenómeno producido cuando se produce un movimiento relativo entre dos o más cuerpos en contacto. Esta fricción da lugar a las fuerzas que se oponen al movimiento de dichos cuerpos. La tribología es la rama de la ciencia encargada del estudio de la fricción, la lubricación y el desgaste de sólidos. En el diseño de máquinas y otros elementos similares, las consideraciones tribológicas son igual de importantes que aquellas relativas a su funcionalidad, diseño, prestaciones. Al igual que es importante que los materiales sean capaces de resistir las cargas de diseño, es importante que la fricción y el desgaste estén controlados, se encuentren dentro de unos valores admisibles para la aplicación del equipo. La fricción además genera un calentamiento de los elementos, mayores consumos de potencia y una pérdida de energía [11].

Considerando que existen dos cuerpos en contacto, sin presencia de lubricante, se puede distinguir dos tipos de fricción distinta: fricción estática y fricción dinámica. La primera de ellas

tiene lugar cuando no existe movimiento relativo entre las zonas en contacto, y la segunda cuando si existe este desplazamiento. Para un mismo par de superficies en contacto, existirá un coeficiente de fricción correspondiente a cada tipo de fricción [11,12].

Tradicionalmente, existen una serie de leyes que regulan esta fricción seca [11,12]:

- La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal.
- La fuerza de fricción no depende del área de contacto.
- La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.

Estas leyes se cumplen con cierta regularidad dentro de los metales. En contactos que involucren polímeros, o materiales con un módulo de elasticidad muy bajo, generalmente no son de aplicación. La tercera ley está menos fundamentada que la primera, ya que al inicio del movimiento la fuerza de fricción suele ser mayor que una vez iniciado el movimiento [11,12].

En el caso de los metales, la fricción tiene su origen en el contacto entre las asperezas de las superficies. Como ya sabemos, una superficie aparentemente lisa posee una gran cantidad de picos y valles, que forman su rugosidad superficial. El contacto entre estos picos y valles dificulta el movimiento relativo, dando lugar a las fuerzas que se oponen al movimiento. Estas pequeñas colisiones, comparables a un ensayo de dureza a una escala muy reducida. La fuerza de fricción generalmente se caracteriza por medio de un coeficiente de fricción, definido como la relación entre la carga normal y la fuerza de rozamiento, definido de la siguiente forma [11,12]:

$$\mu = \frac{F}{W}$$

Donde F es la fuerza necesaria para deslizar el cuerpo y W la carga normal aplicada al mismo.

1.3.1.1 Modelo clásico de fricción

El modelo clásico empleado para caracterizar la fuerza de fricción sugiere que dicha fuerza proviene de las contribuciones de dos fuerzas que se oponen al movimiento: la adhesión entre las asperezas que forman la rugosidad (F_{adh}) y la deformación plástica de las superficies (F_{def}).

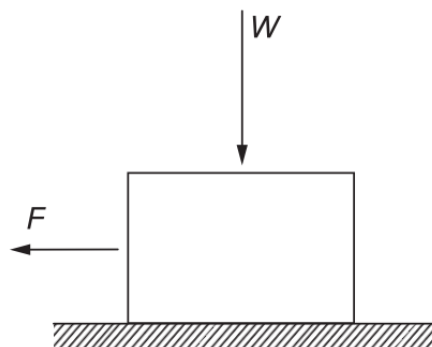


Figura 1.2: fuerzas que dan lugar a la fricción [12]

Cuando dos superficies metálicas limpias en contacto se comprimen entre sí, se observa que se adhieren entre ellas, pudiendo incluso permanecer trazas de una de las dos superficies en la contraria. Esto ocurre principalmente con metales dúctiles. En el caso de materiales más duros,

como los cerámicos o metales endurecidos, este efecto es menor. Esto puede escribirse matemáticamente de la siguiente forma [12]:

$$F_{adh} = As$$

Donde A es el área de contacto entre las asperezas y s la tensión de fluencia del material. El área de contacto es muy difícil de calcular, debido a las reducidas dimensiones y a la complicada geometría de las asperezas. No obstante, sabemos que guarda ciertas proporciones respecto a la carga normal aplicada y a la dureza del material más blando. Es decir [12]:

$$W \approx AH$$

Donde H es la dureza del material más blando. De esta forma, podemos afirmar que la contribución de las fuerzas resultantes de la adhesión tiene la siguiente expresión [12]:

$$\mu_{adh} = \frac{F_{adh}}{W} \approx \frac{s}{H}$$

Asumiendo que la relación entre la dureza del material y de la tensión de fluencia es $H \approx 5s$, el valor de $\mu_{adh} \approx 0,2$. Esta fuerza relativa a la adhesión, podemos comprobar que es la necesaria para romper las asperezas que se han adherido. Por lo tanto, este efecto de adhesión además generará desgaste en las superficies, tal y como se expondrá en la siguiente sección. Por otra parte, la componente asociada a la deformación de las superficies se puede modelizar de la siguiente forma. Si suponemos que existe una aspereza de forma cónica ideal (como la representada en la Figura 1.3) que se desliza sobre una superficie, la fuerza necesaria para que una aspereza y prosiga su movimiento horizontal (sin penetrar verticalmente en la otra superficie) se puede calcular de la siguiente forma [12]:

$$F_{def} = Hax = Hx^2 \tan \alpha$$

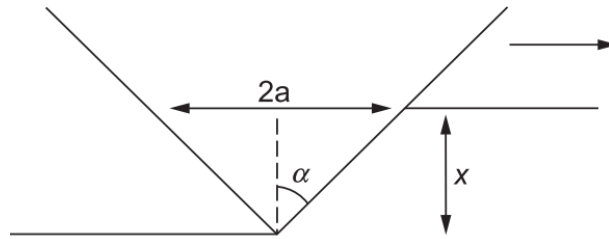


Figura 1.3: aspereza cónica ideal [12]

Por otra parte, la carga normal soportada por la superficie se puede escribir como:

$$W = \frac{H\pi a^2}{2} = H\pi x^2 \tan^2 \alpha$$

Por lo tanto, dividiendo ambos términos podemos obtener que:

$$\mu_{def} = \frac{2 \cot \alpha}{\pi} \approx \cot \alpha$$

Los valores de α , en casos reales, suelen situarse en torno a 80° , por lo que $\mu_{def} \approx 0,1$. Según este modelo, los valores del coeficiente de fricción para los metales deben de ser similar a $\mu = 0,3$. No obstante, en la práctica se demuestra que esto no es cierto. Esto se debe a que no se ha considerado algunos efectos adicionales: el endurecimiento por deformación y a un fenómeno conocido como *junction grown*. Como hemos podido observar, la interacción entre asperezas ocasiona tanto adhesión y rotura como deformación plástica de las mismas. Estas deformaciones, endurecen el material lo cual hace que aumente el valor de μ_{adh} . Este hecho es muy difícil de modelar matemáticamente. El *junction grown* tiene su origen en la hipótesis de que el área de contacto sólo depende de la carga normal. En el caso anterior hemos supuesto que la superficie que sustenta a las asperezas está sometida, únicamente, a un esfuerzo normal uniaxial que genera tensiones cercanas a la tensión de fluencia. Al introducir un esfuerzo cortante, que generaría el movimiento horizontal, el estado tensional cambia. Esto genera variaciones en el área de contacto, y, por lo tanto, en el coeficiente de fricción. Estas variaciones de área generalmente vienen limitadas por la ductilidad del material o por la presencia de ciertas capas en la superficie del material (como óxidos). Este fenómeno guarda relación con el desgaste abrasivo [12].

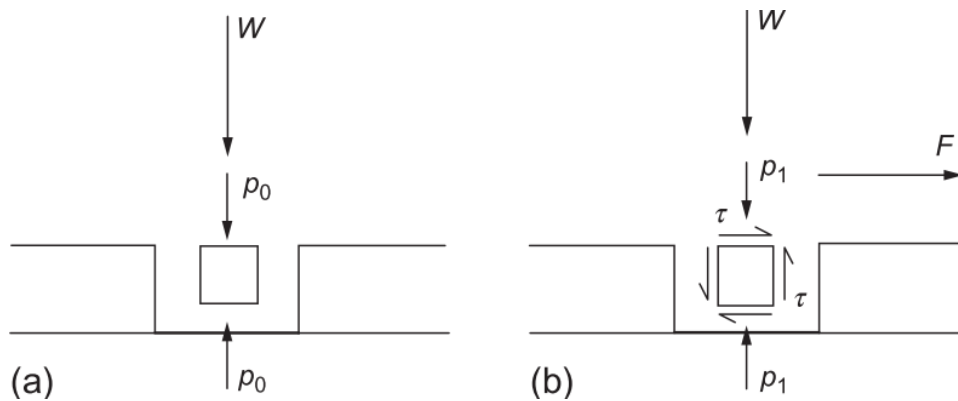


Figura 1.4: Variación del estado tensional en una aspereza idealizada tras la aplicación de una fuerza horizontal. a) antes de aplicar la fuerza, b) después de aplicarla [12]

No obstante, este modelo no es válido en algunas condiciones. Por ejemplo, se puede observar que algunas superficies bajo ciertas condiciones pueden deslizarse entre ellas con altos coeficientes de fricción y bajas cargas normales. La fuerza de rozamiento tiene su origen en a nivel atómico, y es difícil establecer modelos ya que la presencia de contaminantes superficiales puede alterar los resultados [12].

1.3.1.2 Efecto del óxido y de la temperatura

Cuando dos metales se deslizan entre ellos en vacío, se observa un incremento considerable del coeficiente de fricción, respecto al obtenido en fricción al aire. Esto se explica debido a que el contacto de los metales con el oxígeno produce capas de óxido superficiales, generalmente más duras, que cambian el comportamiento tribológico de las superficies, generalmente, disminuyendo el coeficiente de fricción. Es un hecho muy dependiente de la aleación empleada y de la carga normal [12].

Por otra parte, la fuerza de rozamiento también es dependiente de la temperatura. Las transformaciones de fase afectan al comportamiento tribológico, así como las variaciones de dureza y ductilidad que genera los cambios de la temperatura. Con carácter general, a elevada temperatura el coeficiente de fricción aumenta debido al aumento de la ductilidad de las

superficies. Además, la temperatura contribuye a la formación de capas de óxido, lo que puede provocar el efecto contrario [12].

1.3.2 Desgaste

El desgaste, en el ámbito de la ingeniería, se define como la pérdida de material en un componente debido al contacto mecánico entre sólidos bajo la acción de una carga entre ambos. Desde el punto de vista del diseño de máquinas el desgaste es un efecto indeseable, ya que es un proceso perjudicial que acabará por limitar su vida útil. Este desgaste, puede producirse por varios factores, entre los que destacamos la adhesión y la abrasión. Existen otros mecanismos de desgaste, como la erosión, la fatiga y la corrosión cuya influencia puede ser despreciable o inexistente en función del tipo de aplicación.

1.3.2.1 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo se produce cuando dos superficies rozan bajo presión. Las asperezas de la superficie que forman su rugosidad superficial se sueldan entre sí debido a las altas presiones locales. Al moverse relativamente entre ellas, estas asperezas se rompen, ocasionando una pérdida de material en una de las dos superficies y la generación de salientes pronunciados en la otra. La resistencia de los materiales a este tipo de desgaste mejora con las propiedades mecánicas de la superficie. Una elevada resistencia mecánica y una elevada dureza retrasará la aparición de desgaste adhesivo, o al menos, disminuirá su velocidad. La distancia de deslizamiento también aumentará el volumen de material removido por desgaste adhesivo. En este sentido los materiales cerámicos generalmente ofrecen un buen comportamiento. El empleo de superficies lisas, así como la existencia de lubricación, disminuye también la aparición de desgaste [6,11].

El desgaste por adhesión es altamente impredecible, ya que es complicado conocer con anterioridad las condiciones del contacto entre asperezas, y si ese contacto resultará en una soldadura microscópica y en una rotura de esta por una región conocida. Por lo tanto, es necesario recurrir a la experimentación para obtener expresiones que puedan, en cierta manera, orientarnos acerca de la magnitud esperada de desgaste por adhesión. Generalmente se emplea la siguiente expresión para caracterizar el desgaste por adhesión, conocida como *Ecuación de Archard* [11,13,14]:

$$v = \frac{k_1 WL}{3H}$$

Donde k_1 es un coeficiente adimensional obtenido experimentalmente, W es la fuerza normal aplicada, L es la distancia de deslizamiento y H es la dureza del material más blando. El coeficiente k_1 sirve para medir la probabilidad de que el desgaste adhesivo tenga lugar. No obstante, el valor de k_1 puede variar si cambian las condiciones en la que se produzca el deslizamiento, principalmente, la carga normal aplicada [11,14].

Las partículas adheridas a otra superficie pueden generar nuevas asperezas en el material. Estas nuevas asperezas, pueden deformarse plásticamente debido a las altas presiones y a deslizamiento, o pueden romperse nuevamente y volver a formar parte de su superficie de partida [15].

El desgaste adhesivo, además, puede generar trazas de material muy pequeñas que posteriormente darán lugar a desgaste abrasivo.

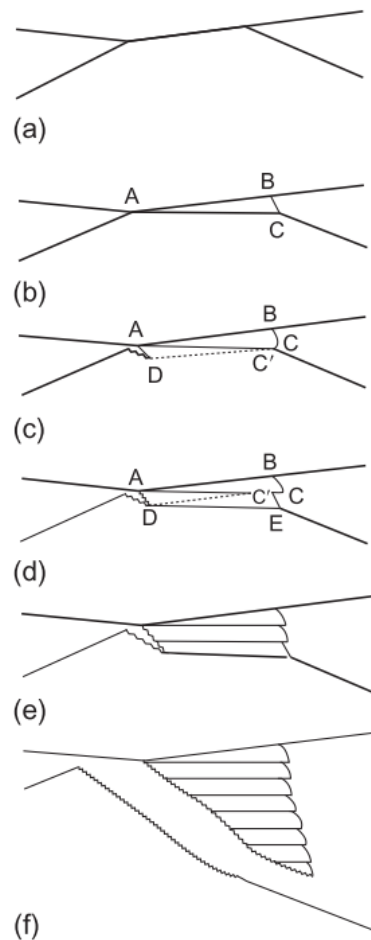


Figura 1.5: esquema del proceso del desgaste adhesivo [14]

1.3.2.2 Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste se produce cuando la eliminación de material se debe a la presencia de partículas duras entre ambas superficies, o a un arranque de material por parte de las asperezas del material más duro (sin producirse adhesión). Estas partículas duras mencionadas anteriormente pueden provenir tanto de trazas de material producidas debido al desgaste adhesivo como introducidas externamente. La dureza y la tenacidad del material son factores clave para prevenir los daños por desgaste abrasivo [6,11,13]. En este tipo de desgaste, la dureza del material abrasivo respecto a la del resto de materiales es un factor determinante. En los casos en los que exista una gran diferencia de dureza, la tasa de desgaste será más rápida. La forma de las partículas abrasivas también tiene una cierta influencia.

Las partículas con una forma aproximadamente esférica producirán una menor cantidad de desgaste abrasivo que aquellas con forma irregular. De la misma forma, partículas más pequeñas provocarán menores tasas de desgaste (sobre todo cuando su tamaño es inferior a 100 μm (como norma general)).

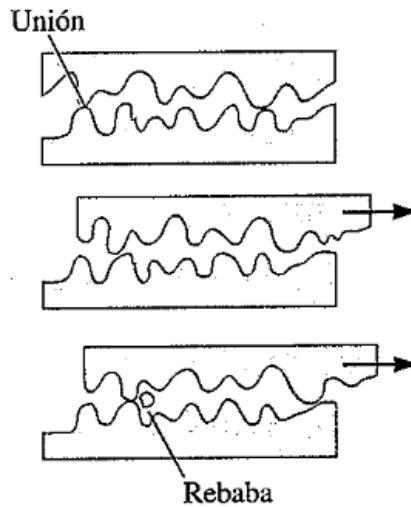


Figura 1.6: desprendimiento de material debido al desgaste adhesivo [6]

Cabe destacar que estos modelos revelan la influencia de las principales variables. No obstante, el desgaste no se puede determinar de manera exacta de forma analítica, debido a que sus fundamentos son complejos y muy dependientes de la integridad superficial de los cuerpos. [11] Por ejemplo, para un mismo par de materiales la microdureza de la superficie, que tras el proceso de fabricación puede verse influenciada, puede influenciar notablemente su comportamiento en cuanto al desgaste.

El desgaste abrasivo, al igual que el adhesivo, es difícil de predecir con exactitud. No obstante, también se puede emplear una expresión similar a la ecuación de Archard para predecir el volumen de material eliminado por desgaste abrasivo [11]:

$$v = \frac{k_1 k_2 W L}{H}$$

Donde k_2 es una constante que guarda relación con la geometría de los cuerpos en contacto.

1.3.2.3 Otras consideraciones sobre el desgaste

El desgaste también puede producirse por otras razones. Como hemos mencionado, la erosión, la corrosión y la fatiga pueden dar lugar a desgaste, pero su influencia no es determinante en el caso de estudio.

Es preciso mencionar que, debido a los esfuerzos generados durante el deslizamiento, se pueden producir grietas que crecen de forma paralela a la dirección de deslizamiento. Esto genera que se desprendan láminas de las superficies en contacto.

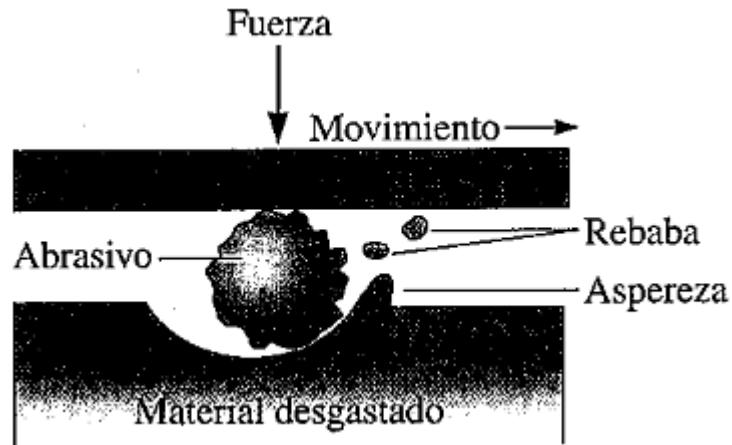


Figura 1.7: esquema del desgaste abrasivo [6]

Este hecho es especialmente significativo cuando las superficies en contacto están recubiertas de capas de óxido. Estas trazas de óxido generalmente constituyen partículas que favorecen el desgaste abrasivo.

El rozamiento entre superficies también puede inducir cambios microestructurales. La deformación plástica generada a nivel superficial puede provocar un endurecimiento por deformación de la superficie y orientar el grano en la dirección del deslizamiento. La disipación de energía en forma de energía térmica también puede generar un sobrecalentamiento que induzca tratamientos térmicos incontrolados en la superficie, así como la generación de capas de óxido superficiales.

1.3.2.4 Desgaste en aleaciones de aluminio

El desgaste adhesivo es uno de los más comunes dentro de las aleaciones de aluminio. Cuando se enfrentan a materiales más duros, este desgaste se manifiesta como una adhesión progresiva de aluminio al material más duro. Desde el punto de vista metalúrgico, las aleaciones de aluminio más indicadas para aplicaciones en la que exista desgaste son las de la serie 2xxx y 4xxx. El cobre produce importantes mejoras en la dureza y en las propiedades mecánicas, lo cual disminuye los efectos perjudiciales del desgaste, así como la adhesión y la abrasión. El silicio además le confiere al aluminio una buena resistencia al desgaste. No obstante, su influencia depende en gran medida del resto de aleantes y de la microestructura de la aleación. Las aleaciones tratables térmicamente, generalmente, ofrecen buenas propiedades respecto al desgaste (sobre todo las de la serie 2xxx) debido a que el mecanismo de endurecimiento por precipitación ofrece un mayor endurecimiento. El mecanismo de endurecimiento por deformación plástica no suele ofrecer resultados respecto a la resistencia al desgaste, ya que el proceso de fricción genera deformación plástica a nivel superficial que altera este procedimiento inicial [16].

La temperatura a la que se produce el movimiento relativo también es bastante importante. A grandes rasgos, mayores temperaturas producirán una mayor tasa de desgaste adhesivo. Esto se debe a una disminución de su dureza y a la resistencia a la propagación de grietas. Por otra parte, a altas temperaturas comienza a manifestarse fenómenos de difusión, aunque es un

fenómeno difícil de caracterizar y su influencia viene condicionada por la composición química de los materiales empleados [15,16].

La velocidad de deslizamiento también tiene una influencia considerable. A bajas velocidades, la tasa de desgaste disminuye conforme aumenta la velocidad de deslizamiento hasta llegar a un mínimo. A partir de ese momento, el desgaste aumenta conforme aumenta la velocidad. Esto se debe a que la velocidad de deformación de las deformaciones producidas a nivel microscópico en la superficie influye en la resistencia de las asperezas. Cuando la velocidad de deslizamiento es muy alta, el calor generado produce los efectos mencionados en el párrafo anterior, disminuyendo por tanto la resistencia al desgaste. Este hecho, sin embargo, es muy dependiente de la naturaleza de los materiales en contacto [16].

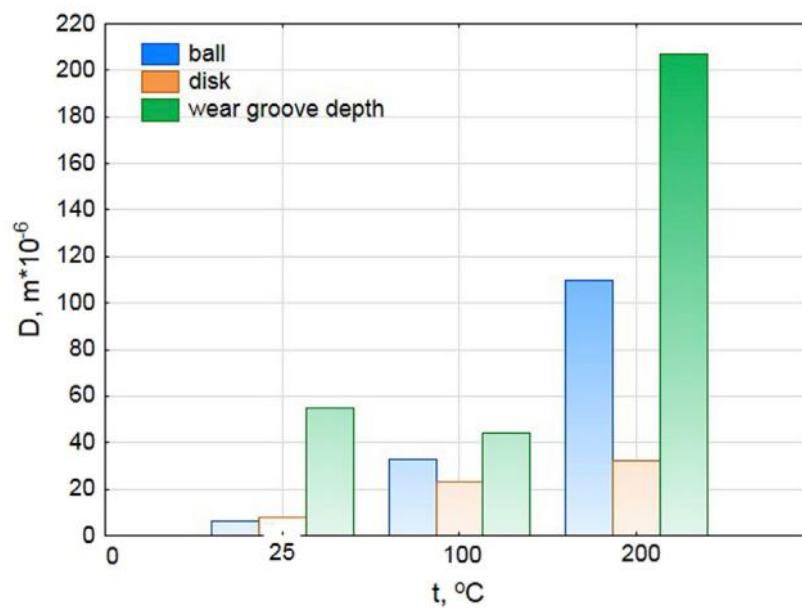


Figura 1.8: variación del espesor de la capa adherido de aluminio y del desgaste en un par acero-aluminio con la temperatura [15]

No obstante, el desgaste abrasivo también puede tener lugar en esta aleación. Durante los primeros instantes, se puede producir una fijación mecánica de precipitados endurecedores existentes en el aluminio (en aleaciones como la A92024) en el material más duro que puede causar desgaste abrasivo [4].

1.4 Lubricación

Todo lo expuesto anteriormente respecto a fricción y desgaste se produce en unas condiciones en la que los cuerpos están directamente en contacto. La lubricación es uno de los métodos más efectivos y más ampliamente usados para disminuir la fricción y el desgaste que tiene asociado. Se trata, además, de una técnica ampliamente estudiada y sobre la que existe una gran cantidad de conocimiento. Consiste en introducir entre las superficies en contacto unas capas de un material (generalmente un fluido), con la intención de separar ambas superficies. De esta forma, se pretende una reducción de la interacción entre las asperezas, las superficies y las posibles partículas abrasivas, con la consiguiente disminución de la fricción y del desgaste [11,17].

Se denomina lubricante a la sustancia introducida entre ambas superficies. Puede ser tanto sólida, líquida o gaseosa, siendo los lubricantes líquidos los más ampliamente usados. En el presente apartado, se tratarán los aspectos más importantes relativos a la lubricación mediante lubricantes líquidos [17].

Las superficies en contacto se pueden separar en dos categorías: superficies concordantes, y no concordantes. En la primera de ellas, la geometría de ambos cuerpos en contacto es similar, y es factible la creación de una película de fluido relativamente grande. La carga se encuentra repartida a lo largo de toda esta película, y es relativamente fácil conseguir espesores de película. Un ejemplo de superficie concordante podría ser un cojinete hidrodinámico. Por otra parte, las superficies no concordantes se caracterizan por tener geometrías diferentes, ocasionando que la carga se encuentre concentrada en una región concreta. De esta forma, la película de fluido que soporta carga es mucho más pequeña, presentando por norma general una menor disminución de la fricción y del desgaste al ser más difícil la generación de una película de fluido gruesa. Un rodamiento de bolas sería un ejemplo de superficies no concordantes [11].

1.4.1 Viscosidad de los lubricantes

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido al movimiento. Podría resultar similar al concepto de fricción, sin embargo, se trata de una propiedad intrínseca de un fluido que se debe a la forma en la que interaccionan sus moléculas entre ellas. También puede definirse como el esfuerzo cortante dentro de un plano del volumen fluido, por unidad del gradiente de velocidad normal a dicho plano. Si suponemos que un fluido se encuentra encerrado entre dos superficies paralelas separadas una altura h , tal y como se muestra en la Figura 1.9. Si suponemos que el plano superior se mueve a una velocidad v_0 , podemos afirmar que el gradiente de velocidad existente en el fluido responde a la siguiente ecuación:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{v_0}{h}$$

Por otra parte, el esfuerzo que debe actuar en el plano para mantener el movimiento (y, por lo tanto, contrarrestar las fuerzas existentes dentro del fluido) se puede calcular como

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

Donde η representa la viscosidad dinámica del fluido. Su unidad en el Sistema Internacional es el Pa·s. Con carácter general, la viscosidad de los lubricantes oscila entre $2 \cdot 10^{-3}$ y $400 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, siendo la viscosidad del agua a 20 °C igual a 10^{-3} Pa·s.

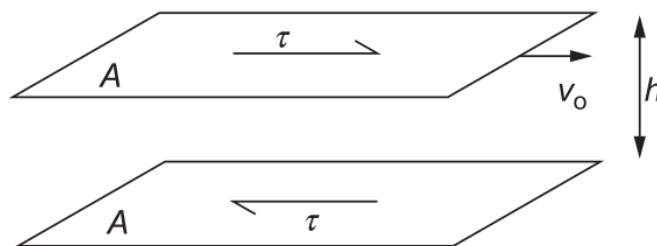


Figura 1.9: Definición de la viscosidad [17]

1.4.2 Regímenes de lubricación

El espesor de la película de fluido es uno de los parámetros más importantes al momento de determinar la eficacia de la lubricación cuando se emplean en máquinas. Se pretende, por norma general, que este sea lo más grande posible para así disminuir los efectos perjudiciales del desgaste y de la fricción. En función de ese espesor, se establecen cuatro regímenes de lubricación diferentes [11,17]:

Lubricación hidrodinámica: es el caso ideal. Se caracteriza por una separación completa de las asperezas de las superficies por medio de la capa de fluido. El espesor de la película generalmente es superior a $1\text{ }\mu\text{m}$, y su presión, encargada de soportar la carga normal entre las superficies, es relativamente baja como para causar deformaciones elásticas en las superficies en contacto. Ofrece una muy buena reducción de la fricción y el desgaste. En este caso, las pérdidas de potencia debidas a la fricción guardarán relación con la viscosidad del lubricante empleado, por lo tanto, es recomendable emplear lubricantes lo suficientemente viscosos como para mantener el espesor de capa y lo suficientemente fluidos para no generar pérdidas, en función de la aplicación. El empleo de bajas cargas normales y de altas velocidades de deslizamiento, favorece este régimen de lubricación. No obstante, el aumento de la velocidad de deslizamiento fuera de la recomendada por el lubricante empleado generará un aumento de los esfuerzos viscosos. Es el régimen de lubricación propio de superficies concordantes. En este caso, los esfuerzos presentes en los cuerpos en deslizamiento pueden calcularse aplicando las ecuaciones clásicas de la mecánica de fluidos, concretamente mediante una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes llamada *ecuación de Reynolds*. Esta ecuación, sin embargo, no posee solución analítica por lo que es necesario efectuar simplificaciones en función de la geometría del sistema en el que se está aplicando [18].

Lubricación elastohidrodinámica: se trata de una particularización del régimen de lubricación hidrodinámica, generalmente asociado a superficies no concordantes. Igualmente, las superficies se encuentran completamente separadas por una película de fluido, pero las deformaciones elásticas en las superficies dejan de ser despreciables. Esto implica que el espesor de película es menos sensible a las variaciones de carga normal que en el caso de la lubricación hidrodinámica, pero es más sensible a las variaciones de velocidad. Además, el espesor de película es, generalmente inferior al obtenido en condiciones hidrodinámicas en el caso de los metales. No obstante, aún no existe interacción entre las asperezas de las superficies. Los esfuerzos viscosos tienden a ser mayores en este caso, debido a que existe unos gradientes de velocidad mayores en la capa de fluido. En el caso de los metales, y en los materiales con un gran módulo de elasticidad, se produce un fenómeno llamado lubricación elastohidrodinámica dura. En este caso, la elevada presión que soporta la película de fluido hace que aumente su viscosidad. Este hecho favorece la existencia de una capa de fluido que separa completamente las asperezas, a pesar de la existencia de grandes presiones. Las deformaciones elásticas producidas en las superficies también contribuyen a la formación de una capa de fluido gruesa.

Lubricación marginal: en este caso, el espesor de la película de fluido no es lo suficientemente grande como para separar las asperezas entre sí. Los efectos que tiene la película fluida pasan a un segundo plano, y el contacto vuelve a regirse, parcialmente, por las propiedades de la fricción seca. El espesor de la película tiene un tamaño

prácticamente molecular, pudiendo oscilar entre 1 y 10 nm. No obstante, el desgaste en esta situación es menor que en el caso de fricción seca, por lo que se emplea en elementos con cargas muy pesadas y bajas velocidades, o en elementos en los que prime el bajo costo. Con el fin de optimizar la disminución de fricción en este régimen de lubricación, se puede emplear ciertos tipos de lubricantes que forman una capa adsorbida a la superficie metálica. Este régimen de lubricación también suele tener lugar durante los arranques y paradas de máquinas, debido a la baja velocidad de deslizamiento.

Lubricación mixta: se trata de un régimen de lubricación intermedio entre la lubricación elastohidrodinámica (o hidrodinámica) y la lubricación marginal. También se conoce como lubricación parcial. En algunas ocasiones, si las velocidades descienden (algo frecuente en los arranques y apagados) o si las cargas aumentan, el espesor de la capa de fluido puede disminuir en algunas regiones, dando lugar a un comportamiento intermedio. A medida que aumenta la carga, las asperezas más grandes empiezan a soportar la carga y a interaccionar unas con otras. Esto sucede debido a una dispersión de la película de fluido.

1.4.3 Parámetro de película

Como se ha mencionado, la efectividad de la lubricación depende de la capacidad de la capa de fluido para evitar el contacto entre asperezas. Con el fin de establecer un criterio para determinar el régimen de lubricación en el que se encuentra un cierto par tribológico, se puede definir el siguiente parámetro, conocido como parámetro de película [11]:

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}$$

Donde h_{\min} es el espesor de la película de fluido y R_{q1} y R_{q2} son el parámetro superficial R_q de ambas superficies en contacto. Se puede tomar como aproximación el siguiente rango de valores del parámetro de película [11]:

- Lubricación hidrodinámica: $\Lambda \geq 5$
- Lubricación elastohidrodinámica: $3 \leq \Lambda < 10$
- Lubricación mixta: $1 \leq \Lambda < 5$
- Lubricación marginal: $\Lambda < 1$

1.4.4 Curva de Stribeck

Como ha sido mencionado anteriormente, el régimen de lubricación guarda una gran relación con el espesor de la película de fluido. En la mayoría de los casos, las variaciones de este espesor dependen de la velocidad de deslizamiento y de las cargas normales. Se conocen como *curva de Stribeck* a la representación gráfica del coeficiente de fricción frente al cociente $\mu U/W$.

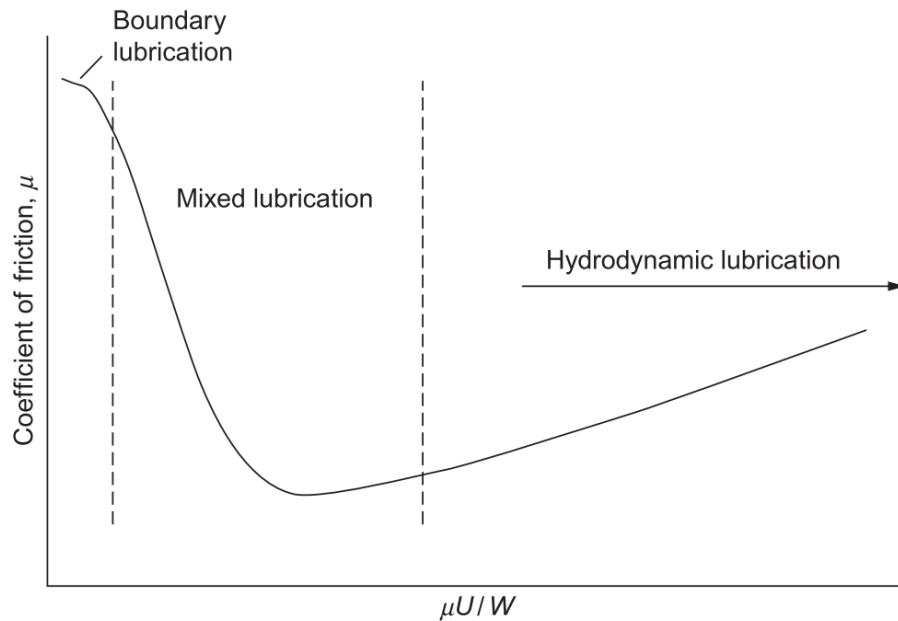


Figura 1.10: Curva de Stribeck [17]

En la Figura 1.10 se puede observar el aspecto de una curva de Stribeck. que existe un valor mínimo para el coeficiente de fricción. En el caso de bajas velocidades, o altas cargas normales se observa un alto coeficiente de fricción. Esto se debe a que el espesor de la película de fluido es muy pequeño y la interacción entre las asperezas es considerable. A medida que disminuyen las cargas o aumenta la velocidad de deslizamiento, el espesor de la película aumenta, disminuyendo la interacción de las asperezas y, por lo tanto, el coeficiente de fricción. Sin embargo, conforme aumenta la velocidad, los esfuerzos cortantes en el fluido aumentan, lo que se refleja en la existencia de un mínimo y en un aumento progresivo del coeficiente de fricción conforme aumenta $\mu U / W$.

1.4.5 Mojabilidad

Un aspecto importante en las superficies lubricadas es la capacidad de las mismas para retener líquidos, conocida como mojabilidad. Esta capacidad está condicionada por sus propiedades fisicoquímicas, así como por su rugosidad superficial, como se expondrá a continuación. El ángulo de contacto entre la tangente a la superficie del líquido en contacto y la superficie se perfila como el parámetro empleado para medir el carácter hidrofílico o hidrofóbico de una superficie. Algunos procesos de fabricación, como el texturizado láser descrito en la metodología experimental, son capaces de modificar la mojabilidad de las superficies mediante la alteración de la rugosidad superficial. Las moléculas de los líquidos están sometidas a una serie de fuerzas de atracción entre ellas. En el interior del líquido, la fuerza neta que actúa sobre cada molécula es igual a cero. No obstante, las partículas superficiales están desequilibradas y su fuerza neta las arrastra hacia el interior del fluido. Esto hace que se generen presiones internas y en consecuencia la gota de líquido adquiera una forma esférica, con el fin de reducir la superficie. La fuerza de la gravedad, sin embargo, deforma la gota y contrarresta este fenómeno. Esto hace que la tangente a la gota en el punto de contacto con la superficie forme un cierto ángulo con la superficie. Este ángulo sirve para determinar si la superficie posee un carácter hidrofílico o

hidrófobo. Un ángulo de contacto inferior a 90° permite asumir que la superficie es hidrofílica, y en caso contrario, hidrófoba [19].

En la práctica, la forma común de obtener el ángulo de contacto es mediante la observación directa. El método más común es el de la observación óptica, empleando un pequeño microscopio. Esto permite obtener el perfil de la gota sobre la que se miden los ángulos. Existen otros métodos, basados en el ascenso del líquido por capilaridad o en la adhesión a una placa vertical [19]. La norma UNE-EN 828:2013 recoge las bases de los ensayos de mojabilidad [20].

Este ángulo no solo está influenciado no solo por las propiedades del fluido, sino también por las propiedades fisicoquímicas de la superficie. Para ello se han desarrollado varios modelos matemáticos. El primer modelo es el modelo de Young, describe el ángulo de contacto en función de las tensiones existentes en la interfase entre la superficie, el líquido y el aire. Matemáticamente se define de la siguiente forma:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta_y$$

Este modelo, sin embargo, asume que la superficie es homogénea y completamente lisa. En la práctica, el ángulo real difiere del calculado con la ecuación de Young, por lo que se han desarrollado otros modelos más cercanos a la realidad, que contemplan la rugosidad, como el modelo de Wenzel, o la heterogeneidad de las superficies, como el de Cassie [19,21]. Esto puede observarse en la Figura 1.11 y en la Figura 1.12.

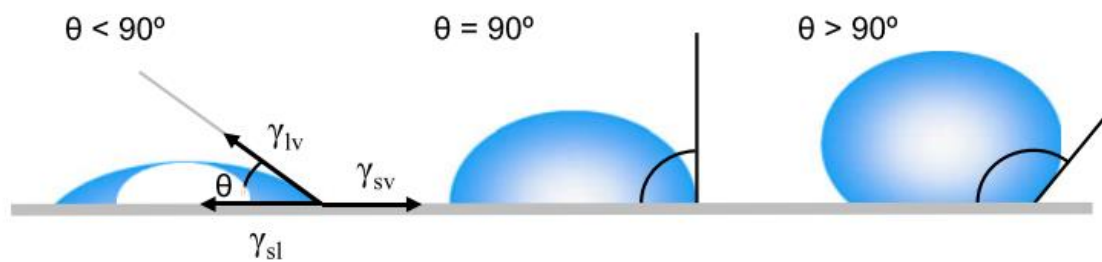


Figura 1.11: Gotas de líquido y sus ángulos de contacto según el modelo de Young [19]

El modelo de Wenzel corrige este problema introduciendo un parámetro llamado *roughness ratio* (r). El modelo de Wenzel parte de la suposición de que el líquido rellena completamente los huecos existentes entre las asperezas de la superficie. Esto es válido si el tamaño de la gota es entre dos y tres veces el tamaño de la rugosidad de la superficie. Se define matemáticamente de la siguiente forma [21]:

$$\cos \theta_m = r \cos \theta_y$$

$$r = 1 + \frac{S_{dr}}{100}$$

Donde θ_m es el ángulo de contacto medido y S_{dr} un parámetro de rugosidad topográfico que relaciona el área real de la superficie con el área proyectada. Su definición se encuentra en la norma ISO 25178. El modelo de Cassie es de utilidad en el caso de que la superficie no sea homogénea, y esté formada por varios materiales. En este caso se define de la siguiente forma [21]:

$$\cos \theta_m = x_1 \cos \theta_{y1} + x_2 \cos \theta_{y2}$$

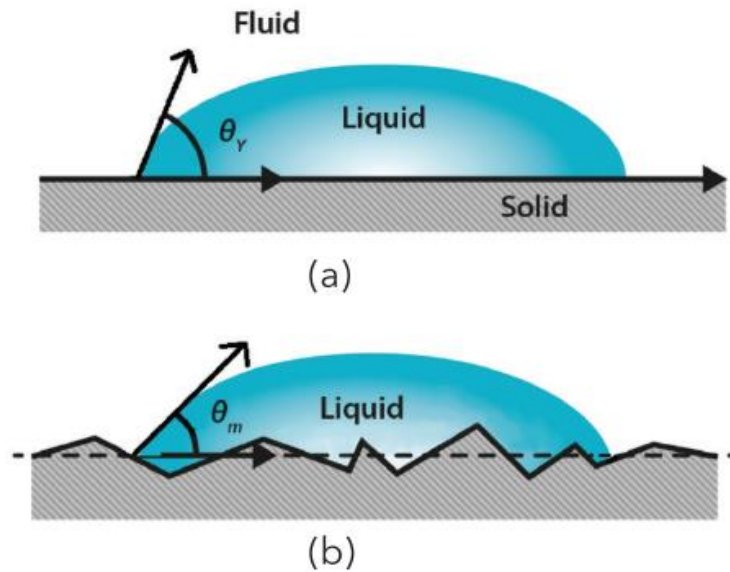


Figura 1.12: Influencia de la rugosidad en el ángulo de contacto [21]

Donde x_1 y x_2 es la fracción de líquido en contacto con cada una de las superficies. Si suponemos una situación similar a la del modelo de Wenzel, en la que el líquido no rellena completamente todos los huecos existentes entre los picos y valles que forman la rugosidad también podemos aplicar este modelo. Si lo particularizamos asumiendo que la superficie dos es aire, el ángulo de contacto es de 180° y si se expresa x_2 como $1 - x_1$ por lo tanto, la expresión se reduce a:

Esta expresión es conocida como ecuación de Cassie-Baxter. La fracción de líquido en contacto con el sólido puede determinarse a partir del parámetro de rugosidad R_{mr} , definido en la norma UNE-EN ISO 4287:1999 [22,23] con la siguiente expresión:

$$x_1 = \frac{R_{mr}}{100}$$

La ecuación de Cassie-Baxter generalmente se utiliza para caracterizar el comportamiento de superficies hidrófobas, mientras que la ecuación de Wenzel se emplea en el caso contrario. Ambas expresiones pueden combinarse para tener en cuenta tanto los efectos de la rugosidad como de las posibles burbujas de gas atrapadas en la superficie. La expresión resultante tomaría la siguiente forma [24]:

$$\cos \theta_m = r x_1 (\cos \theta_y + 1) - 1$$

1.5 Mecanizado láser

Los procesos de mecanizado son un grupo de procesos de fabricación cuyo propósito es el conformado de piezas mediante eliminación de material de esta. Estos procesos, en general, se emplean como procesos intermedios o de acabado, con el objetivo de obtener una geometría o unas propiedades superficiales imposibles de obtener mediante procesos de conformado [5].

Los procesos de mecanizado generalmente se subdividen en dos grandes grupos: procesos de mecanizado convencional y no convencional. Los procesos de mecanizado convencional se caracterizan por generar una viruta macroscópica y emplear energía mecánica para producir el arranque del material. Algunos ejemplos de mecanizado convencional pueden ser el torneado, el fresado y el taladrado. Por otra parte, el mecanizado no convencional incluye a todos los

procesos no encuadrables dentro del mecanizado convencional. En estos procesos, el arranque de material se puede producir empleando energía mecánica (como en el rectificado), térmica (como en el mecanizado láser o la electroerosión), mediante reacciones químicas (como en el fresado químico) o empleando procesos abrasivos y erosivos (como el *Abrasive WaterJet Cutting*) [5,25].

Los procesos de mecanizado no convencionales surgen de la imposibilidad, técnica o económica, de emplear procesos de mecanizado convencionales. Esto incluye [5,25]:

- La necesidad de mecanizar materiales muy duros o con propiedades mecánicas especiales.
- La necesidad de obtener geometrías inusuales o muy complejas, que resulta difícil o imposible realizarlo con procesos convencionales.
- La necesidad de evitar daños en la pieza debido a los altos esfuerzos típicos del mecanizado convencional.
- La necesidad de evitar el calentamiento de la pieza.

El láser tiene un gran campo de aplicación en la industria. Adicionalmente, se puede emplear en operaciones de tratamiento térmico, en soldadura, en medición y en la realización de corte y grabado. También pueden emplearse para limpiar superficies y en procesos de fabricación aditiva (como el SLS O SLM). Un láser es un transductor que convierte la energía eléctrica en un haz luminoso. Sus principales características, que lo hacen especial, es que la luz es monocromática y sus rayos están muy alineados. Esto permite concentrar en un punto una gran cantidad de energía. El proceso de mecanizado láser, por lo tanto, consiste en eliminar material de una superficie mediante la vaporización muy rápida del mismo (lo que también se conoce como ablación) para evitar la fusión del material y la pérdida de precisión [25,26].

El mecanizado láser permite obtener orificios muy pequeños, de un tamaño de hasta 25 μm , así como texturas y grabados en la superficie de las piezas. No se trata de un proceso para la fabricación de grandes lotes, sin embargo, posee las ventajas de que es un proceso rápido, económico, preciso y en el que no se produce desgaste apreciable. Además, el rango de materiales susceptibles de ser mecanizado por láser es muy amplio [25].

Entre sus ventajas destaca la buena calidad obtenida, que permite prescindir en la mayoría de ocasiones de procesos de acabado. Permite mecanizar selectivamente, sin afectar considerablemente al resto de la pieza, los equipos empleados son ligeros y fáciles de transportar, no se requiere el empleo de lubricantes o sustancias químicas contaminantes o peligrosas. También es un proceso flexible, rápido, no produce desgaste en las herramientas, se pueden obtener formas complejas y las propiedades mecánicas de la pieza a mecanizar no influyen en el proceso.

No obstante, es un proceso que tiene un coste inicial alto, sus costes de mantenimiento son elevados y la eficiencia de los láseres suele ser baja. Además, no puede emplearse en materiales transparentes o reflectantes, y está limitado a materiales con muy poco espesor u operaciones superficiales. Para finalizar, su tasa de eliminación de material es pequeña en comparación con los procesos de mecanizado convencional.

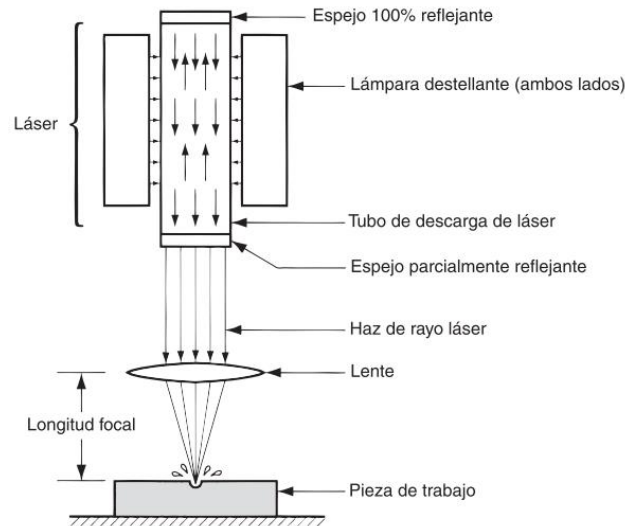


Figura 1.13: Proceso de mecanizado láser [25].

Este proceso además tiene un gran interés en el mecanizado de elementos muy pequeños, tales como texturas, grabados y microtaladros. Para esta aplicación, puede realizarse de tres formas [27]:

- De forma directa: en este caso el láser es proyectado directamente en el material a mecanizar, y se obtienen la geometría deseada moviendo el láser respecto a la superficie. Generalmente, este proceso es controlado por un equipo CNC, y es la técnica más rápida.
- Empleando una máscara: mediante esta técnica, se recubre la pieza a mecanizar con una máscara que deja al descubierto la geometría deseada. A continuación, se ilumina las regiones descubiertas con un láser homogéneo y uniforme. Estas máscaras suelen estar hechas de cuarzo cubiertas de una fina capa de cromo. La ventaja de esta técnica es que permite fabricar patrones repetitivos muy pequeños con buena precisión.
- Técnica de interferencia: esta consiste en dividir el haz láser en varios haces más pequeños, que se superponen e interfieren unos con otros, creando ciertos patrones.

1.5.1 Principio de funcionamiento del láser

Los láseres se basan en el principio de la emisión de luz estimulada. Los electrones de los átomos pueden cambiar a orbitales superiores si reciben la suficiente energía para ello. Este estado no es estable, por lo que transcurrido un tiempo característico de cada átomo, vuelven a su estado inicial de equilibrio. En este proceso, emiten energía en forma de fotones. En un estado de reposo, la mayor parte de los electrones se encuentran en su estado fundamental, y una fracción de ellos se encuentra en orbitales más energéticos de forma espontánea. Mediante la adición de energía, podemos inducir a la mayoría de los electrones del material a situarse en orbitales más energéticos. Este efecto se conoce como inversión de la población. Este aporte de energía puede hacerse mediante energía eléctrica, térmica, lumínica o mecánica. El paso de este estado más energético al estado fundamental es el responsable de la generación del haz láser [26].

El principio de funcionamiento de la emisión estimulada consiste en que la disminución del nivel energético de un electrón se produce cuando interacciona con él un fotón procedente del exterior. Entonces, el electrón disminuirá su nivel energético emitiendo otro fotón con la misma longitud de onda y dirección que el fotón externo [26].

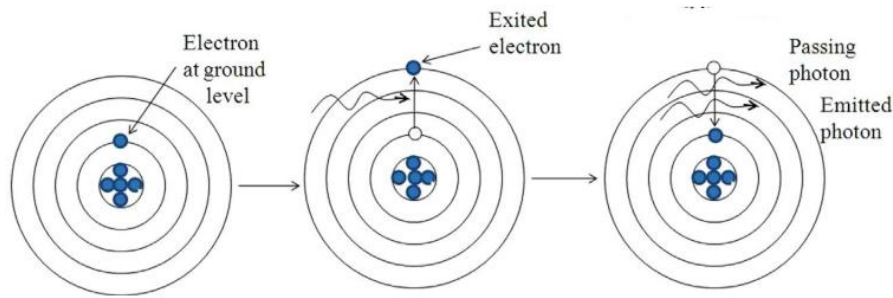


Figura 1.14: principio de funcionamiento de la emisión estimulada [26]

Este hecho se debe a que las leyes de la mecánica cuántica establecen que los niveles energéticos de los átomos son discretos. El fotón incidente que inicia la emisión estimulada debe tener la misma energía que la diferencia de energía entre los orbitales excitados (los de mayor energía) y el fundamental. Este fotón no es absorbido porque la energía que transmite no corresponde a la permitida para ningún orbital superior, por lo que el electrón emite tanto la energía que le había permitido situarse en el orbital superior como la del fotón incidente. Esta energía está relacionada con la frecuencia y la longitud de onda de los fotones, mediante las ecuaciones de la mecánica cuántica [26]:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E_2 - E_1 = h\gamma$$

Donde E es la energía del fotón, E_2 y E_1 son las energías correspondientes al estado excitado y fundamental de los electrones, h es la constante de Planck, γ es la frecuencia del fotón y λ es la longitud de onda del fotón. El proceso de emisión de fotos por parte de átomos se produce de forma espontánea en una dirección aleatoria. Si la mayoría de los átomos están en estado fundamental, este hecho no genera un haz láser ya que el fotón emitido excitaría otro átomo. Sin embargo, en condiciones de inversión de la población, los átomos no absorben esta energía, sino que se produce un fenómeno de emisión estimulada a gran escala [26].

Los láseres, además, se construyen empleando una serie de espejos que redirecciona el haz de fotones dentro de la cámara donde se produce este fenómeno, contribuyendo a su vez a una mayor estimulación de los átomos y la emisión de más fotones. Uno de los espejos es completamente reflectante, y otro semirreflectante para permitir la salida del haz de luz. En la Figura 1.15 puede ver el esquema de funcionamiento de un láser de Nd:YAG [26].

1.5.2 Mecanismo de eliminación de material

Cuando el láser es proyectado en una superficie, se produce un calentamiento, fusión y evaporación del material donde incide el haz. Al incidir el láser, se produce una excitación de los átomos de la región.

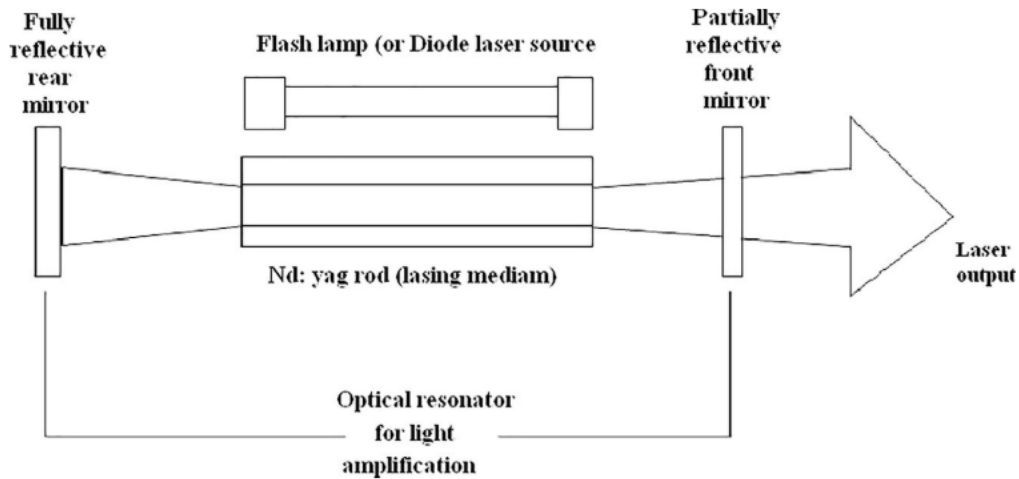


Figura 1.15: esquema de funcionamiento de un láser de Nd:YAG [26]

Al volver a su estado fundamental, liberan esta energía en forma de calor [28]. Este calentamiento depende de la cantidad de radiación absorbida, que a su vez depende de la longitud de onda del láser, de la temperatura, de la reflectividad de la superficie, del ángulo de incidencia, de la potencia del láser y del enfoque del haz [26]

El haz puede tener varios efectos en la pieza. Dependiendo de la cantidad de radiación absorbida por unidad de tiempo, puede producirse desde una transferencia de calor desde la superficie hasta un proceso de ablación. Este último proceso consiste en una vaporización del material extremadamente rápida, que genera eliminación de material en la superficie sin producir calentamiento ni efectos térmicos apreciables en las regiones adyacentes. Los láseres pulsantes ultracortos favorecen este proceso. Con el empleo de láseres menos potentes, continuos o con un gran ancho de pulso puede producirse un calentamiento de las regiones adyacentes de la superficie, así como una fusión de estas sin llegar a vaporizar. Esto puede afectar a la integridad superficial de la pieza [26].

El mecanismo de eliminación de material más importante en el mecanizado láser es el proceso de ablación. Se produce cuando incide una gran cantidad de energía en regiones concretas del material durante un tiempo muy corto. Esto permite que los átomos adquieran una gran cantidad de energía y abandonen la superficie a causa de este calentamiento. Por lo tanto, el proceso de ablación realmente es un proceso de sublimación. En estas condiciones, se produce una cierta cantidad de plasma en la superficie como consecuencia de la nube de átomos saliendo de la superficie. Esta nube de plasma puede dar lugar a la formación de rebabas sobre la superficie, que generalmente son fáciles de eliminar mediante ultrasonidos. En esta situación, apenas se produce conducción térmica desde los átomos excitados hasta sus átomos vecinos, y las regiones afectadas por el láser tienen un espesor muy pequeño (similar al espesor hasta el que es capaz de penetrar el haz). El empleo de láseres con un ancho de pulso ultracortos favorece este mecanismo [28].

1.5.3 Tipos de láser

En general los tipos de láser empleados en mecanizado láser (el tipo de transductor) se dividen en dos grandes grupos: láser de estado sólido y láser de gas. Los láseres de estado sólido se dividen, a su vez, en láser de Nd:YAG, láser de fibra, láser de diodo y láser de Ti:Sapphire, entre otros.

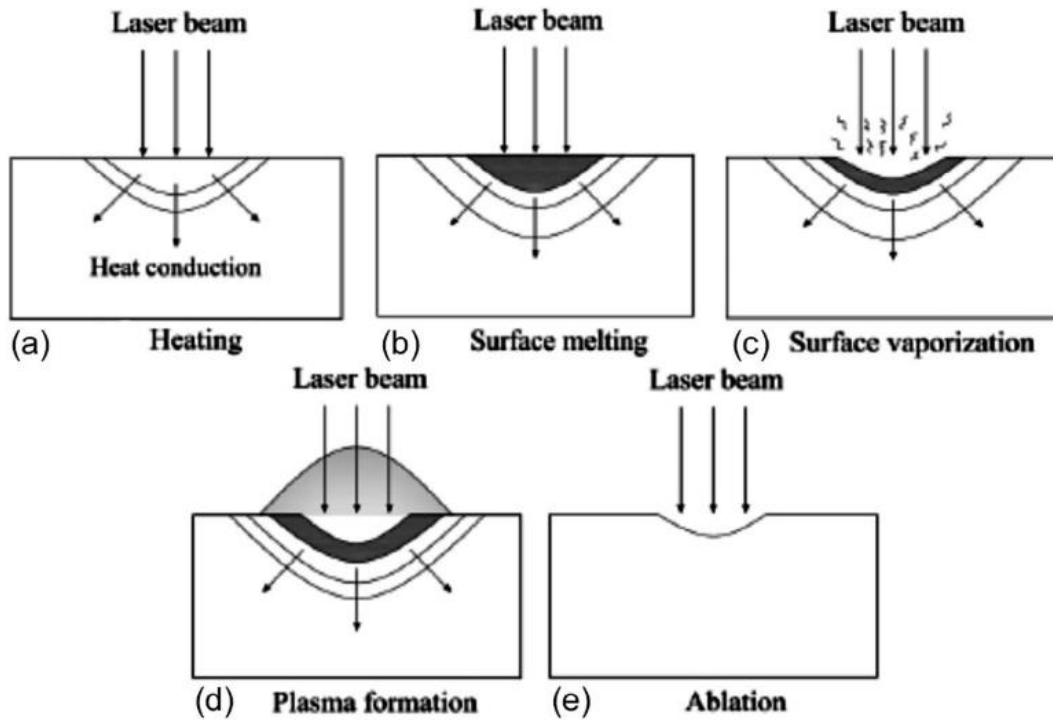


Figura 1.16: efectos del láser sobre la superficie [26]

A su vez los láseres de gas se dividen en láser de CO₂ láser excimer (combinación de un gas inerte con uno reactivo) y láser de vapor de cobre. Por otra parte, en función del tipo de haz generado también se pueden clasificar en láseres continuos (CW) o láseres pulsantes (PW). Estos últimos no emiten una luz continua, sino una serie de pulsos [26].

Dependiendo de su duración, se subdividen en pulso largo (aproximadamente del orden de milisegundos), pulso corto (entre microsegundos y nanosegundos) y pulso ultracorto (del orden de picosegundos y femtosegundos). Este último tipo de láser son bastante recomendables para el mecanizado láser, ya que generan picos de potencia muy grandes y los efectos térmicos debido a la conducción del calor en la pieza son despreciables [26].

Para finalizar, los láseres también pueden clasificarse en función de su potencia (potencia alta, o potencia baja) o en función de la longitud de onda del haz emitido (láseres infrarrojos o ultravioletas). En la

Tabla 1.61.6 puede encontrar un pequeño resumen de los tipos de láser más usados.

1.5.4 Parámetros tecnológicos

Al igual que en todos los procesos de fabricación, existen unos parámetros que controlan el proceso. En el caso del mecanizado láser, los más importantes son los siguientes [26]:

- Frecuencia del pulso.
- Duración del pulso.
- Pico de potencia.
- Velocidad de escaneo.
- Tamaño del *spot*.
- Presión del gas.

A continuación se detallan los más relevantes de los anteriormente comentados.

1.5.4.1 Frecuencia del pulso, duración del pulso y pico de potencia

La frecuencia del pulso no es más que el número de pulsos por unidad de tiempo. Este parámetro, junto a la duración del pulso y el pico de potencia regulan la cantidad de energía que incide sobre el material, y deben de ajustarse en función de la geometría y propiedades que se desea obtener. Dichos parámetros se pueden relacionar con la siguiente expresión [26]:

$$P_p = \frac{P_m}{f \cdot t}$$

Donde P_p es el pico de potencia, P_m es la potencia media, f la frecuencia del pulso y t la duración del pulso. El empleo de altos picos de potencia durante tiempos reducidos genera una rápida ablación en el material. En estas circunstancias, los efectos térmicos en las zonas adyacente son despreciables, lo cual hace que los láseres potentes con una duración del pulso ultracorta ofrezcan buenos resultados en la realización de grabados. En el caso de que se desee, además, conseguir tratamientos térmicos superficiales, se recomienda el empleo de láseres poco potentes con una duración de pulso mayor, o incluso láseres continuos [27,28].

Para que el proceso de ablación, anteriormente mencionado, tenga lugar se requiere que la intensidad de láser supere un cierto umbral dependiente del material. Esta intensidad se define como el pico de potencia entre el área del *spot* (el área transversal del haz en el foco) [28]. En el caso de los metales, que tienen una gran conductividad térmica, es muy beneficioso el uso de láseres con una duración de pulso ultracorta, altas potencias y un reducido tamaño del *spot* para garantizar el proceso de ablación [28].

Tabla 1.6: tipos de láser más comunes [26]

Tipo de láser	Material	Longitud de onda	de longitud de pulso	Frecuencia
Láser de estado sólido	Nd:YAG	266-532 nm	10-100 ns	50 Hz
	Ti:Sapphire	750-880 nm	6-150 fs	15 MHz – 2 GHz
	Fibra	1064 nm	100 ns	20-50 Hz
	Diodo	800 nm	-	-
	Nd:YVO	1064 nm	2.8-7.9 ps	84 MHz – 77 GHz
	Nd:GdVO	1053 nm	37 ps	100 MHz
	Nd:BEL	1070 nm	2.9-7.5 ps	250 MHz – 20 GHz
	Nd:LSB	1062 nm	1.6-2.8 ps	177 – 240 MHz
	Nd:glass	1054 nm	7 ps	112 MHz
	Nd:VAN	750-870 nm	-	-
	Nd:YLF	1047-1053 nm	1.5-37 ps	76 MHz – 2,85 GHz
	Yb:YAG	1030 nm	340-730 fs	35 – 81 GHz
	Yb:glass	1025-1082 nm	58-61 fs	112 MHz
	Yb:GdCOB	1045 nm	90 fs	100 MHz
	Yb:KGW	1037 nm	176 fs	86 MHz
	Cr:LiSAF	800-880 nm	12-220 fs	82 – 200 MHz
	Cr:LiCAF	800-820 nm	20-170 fs	90 – 95 MHz

	Cr:LiSGaF	830-895 nm	14 -100 fs	71 – 119 MHz
	Cr:LiSCaf	860 nm	90 fs	140 MHz
	Cr:Forsterite	1210-1290 nm	14-78 fs	81 – 100 MHz
	Cr:YAG	1520 nm	44-120 fs	81 MHz – 1,2 GHz
	Microchip	1064 nm	<100 ns	100 kHz
Láser de gas	CO ₂	10 μm	200 μs	5 Hz
	Vapor de cobre	578-611 nm	30 ns	4-20 Hz
	ArF	193 nm	5-25 ns	1-1000 Hz
	KrF	248 nm	2-60 ns	1-500 Hz
	XeCl	308 nm	1-250 ns	1-500 Hz
	XeF	353 nm	0.3-35 ns	1-1000 Hz

1.5.4.2 Velocidad de escaneo

La velocidad de escaneo es un parámetro muy influyente en la profundidad del mecanizado. Una menor velocidad de escaneo generará una mayor profundidad mecanizada. En el caso de que se empleen láseres pulsantes, la velocidad de escaneo suele tener un valor máximo recomendado, ya que para garantizar la calidad del resultado final es necesario que se produzca cierto solapamiento entre las regiones mecanizadas por cada pulso del láser. Como regla general, la velocidad debe calcularse para que exista un solapamiento mínimo del 50% [26].

1.5.4.3 Presión del gas

Durante el mecanizado láser, se puede emplear un chorro de aire o gas inerte (como el helio o el argón) que impacte contra la zona incidente del láser para ayudar la eliminación del material vaporizado. Este vapor se vuelve sólido (en forma de polvo) instantes después de la su eliminación, lo cual puede generar rebabas sobre la superficie [26,28].

Además, también contribuye a una mejora de la integridad superficial, enfriando la pieza y reduciendo los efectos térmicos. Sin embargo, una presión de aire excesiva puede generar vibraciones en la pieza que afecten a las tolerancias y al resultado del proceso [26].

1.6 Texturizado láser

En los últimos años, se ha popularizado una técnica para optimizar las propiedades tribológicas de componentes mecánicos, llamada texturizado superficial. Consiste en grabar unos ciertos patrones, consistentes en líneas, surcos y orificios muy pequeños en las superficies en contacto. Estas texturas pueden tener una geometría muy variada (como se puede observar en la Figura 1.17), aunque las más comunes en la literatura científica son los *dimples* (pequeños orificios cilíndricos) y las líneas. Los efectos de estas texturas son muy variados, y dependientes de las condiciones de lubricación. Son capaces de aumentar el espesor de la capa de fluido, actuar como microrreservas de lubricante, atrapar partículas abrasivas [29] y mejorar la mojabilidad [2], entre otros efectos adicionales.

Existen dos posibles líneas de investigación al respecto. Por un lado, algunos proyectos se centran en la simulación y optimización del diseño de texturas en base a las teorías subyacentes a los fenómenos de lubricación hidrodinámica y elastohidrodinámica. Por otra parte, otros trabajos se centran en la aplicación práctica del texturizado en componentes de automóviles,

herramientas y equipos para el conformado plástico, rodamientos, componentes de motores alternativos y elementos similares sometidos a un desgaste intenso [29].

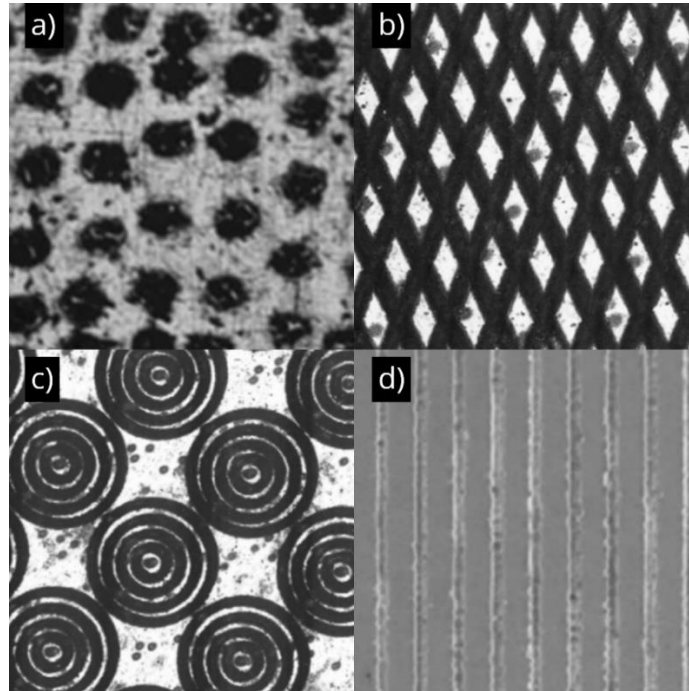


Figura 1.17: diferentes geometrías de texturas. a) dimples, b) líneas cruzadas, c) circunferencias, d) líneas paralelas [2,30]

Los primeros estudios y experimentos sobre el texturizado láser en la optimización de las propiedades tribológicas de los materiales datan de la década de 1940, donde se grabaron texturas en anillos de pistones de motores diésel para controlar la fricción y reducir el desgaste [30].

En la fabricación de estas texturas, se pueden emplear varios métodos entre los que destacan el grabado mediante iones reactivos (RIE), fotograbado, texturizado láser (LST), grabado mecánico [29], electroerosión [31] o fabricar esas texturas mediante procesos de fabricación aditiva [32]. El texturizado láser, debido a las ventajas mencionadas en el apartado anterior, es uno de los más ampliamente usado. También puede emplearse recubrimientos que aporten una cierta textura al material base. El texturizado láser posee una ventaja respecto al resto de procesos debido a su rapidez, eficiencia, economía, precisión y ser respetuoso con el medio ambiente. Este proceso se ha empleado en la optimización de propiedades tribológicas de sellos mecánicos para bombas hidráulicas, rodamientos, cojinetes y componentes de motores [30].

1.6.1 Efecto en la mojabilidad

El texturizado del material supone una modificación de sus características topográficas. Según los modelos de Wenzel y Cassie-Baxter, los parámetros de rugosidad de la superficie condicionarán el ángulo de contacto, por lo que es de esperar que el efecto del texturizado no pase desapercibido respecto a la mojabilidad de la superficie. Es por ello por lo que existen estudios en la literatura científica que tratan de correlacionar el efecto de las texturas con el de la mojabilidad.

En anteriores estudios llevados a cabo en esta misma universidad, Vázquez et Al. [33] trataron de mejorar la retención de lubricante en herramientas de corte de CW-Co mediante texturizado láser. Para ello, realizaron diferentes texturas con forma de *dimples*, líneas y circunferencias, obteniendo una disminución considerable del ángulo de contacto del fluido.

Damborenea et Al [2] realizaron ensayos de mojabilidad en probetas de la aleación A92024 texturizada, con dimples, líneas y circunferencias concéntricas, donde obtuvieron un incremento del ángulo de contacto. Concluyeron que esto se debe a que el texturizado aumentó la rugosidad de la superficie, y, por lo tanto, su mojabilidad.

1.6.2 Efecto en la lubricación marginal

La lubricación marginal, como se ha mencionado anteriormente, se caracteriza por altos niveles de rozamiento y desgaste en comparación con otros regímenes de lubricación. Por esta razón, muchos estudios tratan de optimizar este régimen de lubricación. En este caso, el papel predominante de las texturas es el de atrapar las partículas que se generan mediante el desgaste y contribuyen al desgaste abrasivo, así como actuar como reserva de lubricante.

Galda et Al [34] realizaron experimentos mediante ensayos pin-on-disc con pares tribológicos acero-acero y la bola ligeramente aplanada (hasta obtener un área de contacto de 10 mm²) en condiciones de lubricación marginal y superficies concordantes. Realizaron las texturas golpeando la superficie de la probeta con un pequeño punzón esférico, obteniendo texturas con un diámetro entre 160 y 300 µm. Obtuvieron una disminución del coeficiente de fricción mediante el uso de las texturas en comparación con una muestra sin texturizar. Estas texturas permiten incluso que el régimen de lubricación evolucione de marginal al parcial.

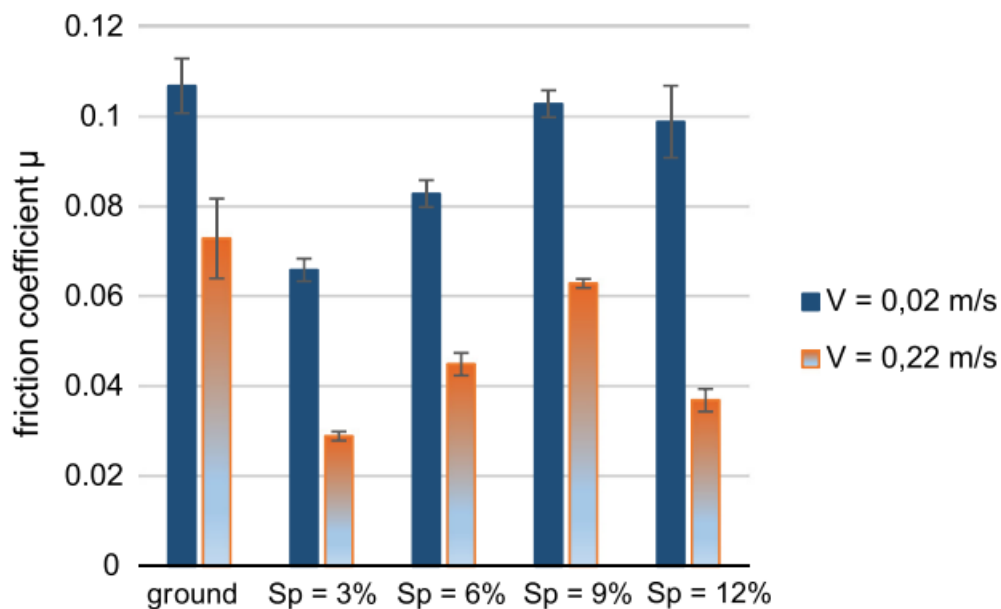


Figura 1.18: coeficiente de fricción promedio obtenido por Galda et Al [34]

Wang et Al [35] realizaron ensayos pin-on-disc recíprocos empleando bolas de alúmina contra acero, texturizado con una serie de líneas con distinta separación y orientación respecto al deslizamiento. Los ensayos se realizaron en condiciones de lubricación marginal y empleando

superficies no concordantes. Obtuvieron mejoras en el coeficiente de fricción y en la resistencia al desgaste, debido al papel de reservas de lubricante de las texturas y al atrapamiento de partículas abrasivas generadas durante la fricción. Además, observaron que para separaciones de líneas muy pequeñas el área disminuye mucho (lo que supone un aumento de la presión de contacto) y para grandes separaciones el efecto de las texturas se diluye, por lo que existe una separación óptima.

Anteriores estudios realizados en esta misma Universidad por Salguero et Al [36] revelaron que el texturizado de aleaciones de titanio mejoraba su comportamiento tribológico, así como su mojabilidad. Para ello, realizaron ensayos pin-on-disc empleando un pin de CW contra discos de la aleación Ti6Al4V en condiciones de lubricación marginal. Obtuvieron mejoras en el desgaste de los elementos en las probetas texturizadas, pudiendo deberse a una mejor retención del lubricante. También evidenciaron que los parámetros del texturizado láser condicionaban el resultado final de los experimentos, ofreciendo aquellas texturas fabricadas con una mayor densidad de energía y menor velocidad de escaneo mejores resultados.

Por otro lado, Yamaguchi et Al [31] realizaron ensayos pin-on-disc con un par tribológico acero-acero y texturas fabricadas por EDM. Obtuvieron una mejora del coeficiente de fricción, sobre todo a bajas velocidades de deslizamiento y en condiciones de lubricación marginal o parcial, ya que disminuía el coeficiente de fricción y favorecía la creación de una capa de fluido de cierto espesor.

1.6.3 Efecto en la lubricación parcial, elastohidrodinámica e hidrodinámica

Gran parte de los estudios realizados sobre la influencia del texturizado láser en las propiedades tribológicas persiguen un aumento del espesor de la capa de fluido. Esto permite disminuir el fricción y el desgaste de superficies. Este interés proviene de que gran cantidad de máquinas y equipos funcionan en régimen permanente, de ahí la necesidad de favorecer la existencia de capas de fluido grandes.

La mayor cantidad de estudios realizados parten del uso de pares superficies concordantes, como puede ser cojinetes hidrodinámicos, sellos mecánicos o anillos de pistones. Existen también algunas publicaciones respecto a superficies no concordantes, pero la mayoría de ellas se centran en el estudio en el régimen de lubricación marginal, como se ha mencionado anteriormente.

1.6.3.1 Efecto en superficies no concordantes

Existen pocos estudios sobre el empleo de superficies concordantes bajo estas condiciones. Bajo las mismas, la capa de fluido se dispersa con más facilidad. No obstante, existen algunos estudios sobre la temática, que se comentan a continuación.

Li et Al [37] realizaron varios ensayos pin-on-disc recíprocos para estudiar el efecto del texturizado láser con diversas densidades de *dimples*. Emplearon un par tribológico acero-acero, una bola de 9,5 mm y dureza 63,8 HRC y una aleación de galio líquida como lubricante. Las texturas fueron fabricadas mediante texturizado láser empleando un láser de nanosegundo. Obtuvieron una mejora del coeficiente de fricción y del desgaste de las superficies, especialmente con el empleo de una densidad de texturas del 15%.

Por otro lado, Kovalchenko et Al [38] realizaron ensayos pin-on-disc empleando pares tribológicos acero-acero, bajo distintas velocidades y empleando lubricantes de distintas densidades. Obtuvieron un resultado llamativo, ya que el desgaste en la bola era notablemente superior en las muestras texturizadas. Cuando no se emplearon muestras texturizadas, obtuvieron valores constantes de coeficiente de fricción, dentro de un régimen de lubricación marginal. Este desgaste de la bola en el caso de las muestras texturizadas se debe a una posible disminución del espesor de capa cuando se emplea una bola contra una superficie plana, así como a una concentración de esfuerzos en los bordes de las texturas. Este desgaste aplana la superficie de la bola, transformando la superficie inicialmente no concordante en una concordante, por lo que se produjo una reducción del fricción debido a una transición hacia el régimen de lubricación parcial. En la Figura 1.19 observamos la evolución del coeficiente de fricción para las diversas muestras. Observamos que existe una densidad de texturas óptima, así como una mejora de la fricción en las muestras texturizadas por el efecto mencionado anteriormente.

Por último, Costa et Al [39] realizaron ensayos tribológicos recíprocos empleando placas de acero, con texturas lineales, circulares y en forma de flecha obtenidas mediante fresado fotoquímico, y bronce sin texturizar. Obtuvieron conclusiones similares a las del estudio de Kovalchenko et Al anteriormente mencionado. El empleo de texturas más grandes que el área de contacto empeora el coeficiente de fricción debido a que el efecto favorecedor de lubricación hidrodinámica desaparece, y, por el contrario, se produce concentración de tensiones en los bordes de las texturas y una disminución del espesor de capa.

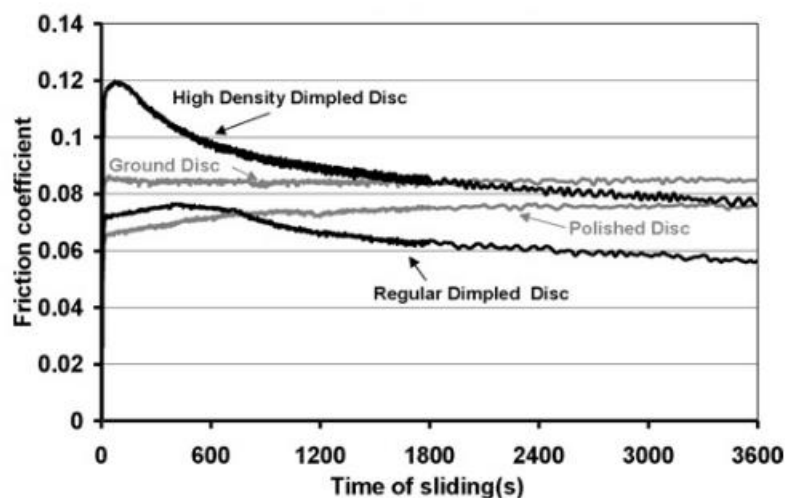


Figura 1.19: coeficiente de fricción en los ensayos de Kovalchenko et Al [38]

1.6.3.2 Efecto en superficies concordantes

La mayor parte de los estudios realizados en cuanto a texturizado, se centran en la optimización del régimen de lubricación cuando se emplean superficies concordantes. Estas superficies de por sí favorecen la aparición del régimen de lubricación hidrodinámica, con las ventajas que conlleva.

Kovalchenko et Al [40] realizaron una serie de ensayos pin-on-disc empleando una bola de 9,55 mm de diámetro con una cara ligeramente aplanada y dureza 60 HRC contra otro disco de acero.

Realizaron varios ensayos, con discos pulidos, sin procesos de acabado, con varias densidades de *dimples* (patrón de texturas consistentes en pequeños orificios circulares) con lapeado posterior al texturizado y *dimples* sin lapear. Además, estos ensayos se hicieron en presencia de diversos lubricantes y a distintas velocidades de deslizamiento con una carga normal de 20 N. Concluyeron que las muestras texturizadas con una densidad de *dimples* del 12% ofrecían un menor coeficiente de fricción que las no texturizadas y que aquellas con diferentes densidades de texturas. A bajas velocidades, las texturas aumentan el espesor de la capa de fluido y favorecen la aparición de un régimen de lubricación elastohidrodinámica respecto a superficies no texturizadas.

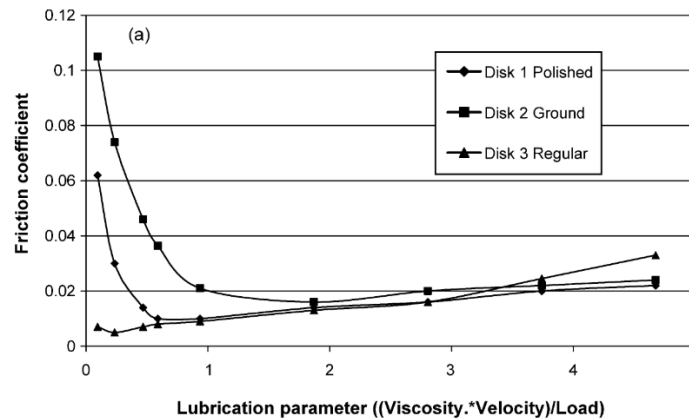


Figura 1.20: curva de Stribeck de los ensayos de Kovalchenko et Al[40]

Galda et Al [41] también realizaron ensayos tribológicos para determinar el efecto de las texturas en la fricción en cojinetes hidrodinámicos. La carcasa de dicho cojinete estaba fabricada en bronce CuSn10P y el cojinete en acero endurecido 42CrMo4. Se realizaron varios ensayos, texturizando el cojinete, la carcasa y sin texturizar ningún elemento. Las superficies sin texturizar tenían una rugosidad entre 0,15 y 0,2 μm . Las texturas, obtenidas mediante el golpeo de las superficies con un pequeño punzón esférico, tenían una profundidad de aproximadamente 50 μm y un diámetro entre 0,7-0,9 mm. Por una parte, se realizaron ensayos bajo una carga de 6 kN, partiendo de una velocidad constante y disminuyéndola para analizar el comportamiento en paradas. Otra serie de ensayos se realizó bajo una carga entre 1,5-4,5 kN a velocidad constante de 100 rpm para analizar el comportamiento en servicio. Concluyeron que el empleo de texturizado disminuía el coeficiente de fricción a bajas velocidades, y favorece la aparición del régimen de lubricación hidrodinámico, como se puede ver en la curva de Stribeck de la Figura 1.21. Esto es debido a que las texturas actúan como reserva de lubricante y aportan una cierta presión a la capa de fluido.

Henry et. al [42] realizaron experimentos similares, en el caso de arranques de maquinaria. Obtuvieron resultados similares empleando *dimples* cuadrados. Sin embargo, en los experimentos realizados a velocidad constante, obtuvieron unos valores óptimos para el coeficiente de fricción cuando ningún elemento estaba texturizado. Concluyeron que esto se debe a que la película de fluido se interrumpía en las zonas adyacente a las texturas debido a que su profundidad era similar al juego entre ambos elementos. Tala-ighil et Al [43] estudiaron este fenómeno de forma teórica mediante un desarrollo de la ecuación de Reynolds, y concluyeron que un diseño correcto del texturizado en función de la geometría del cojinete puede ser beneficioso respecto a las propiedades tribológicas.

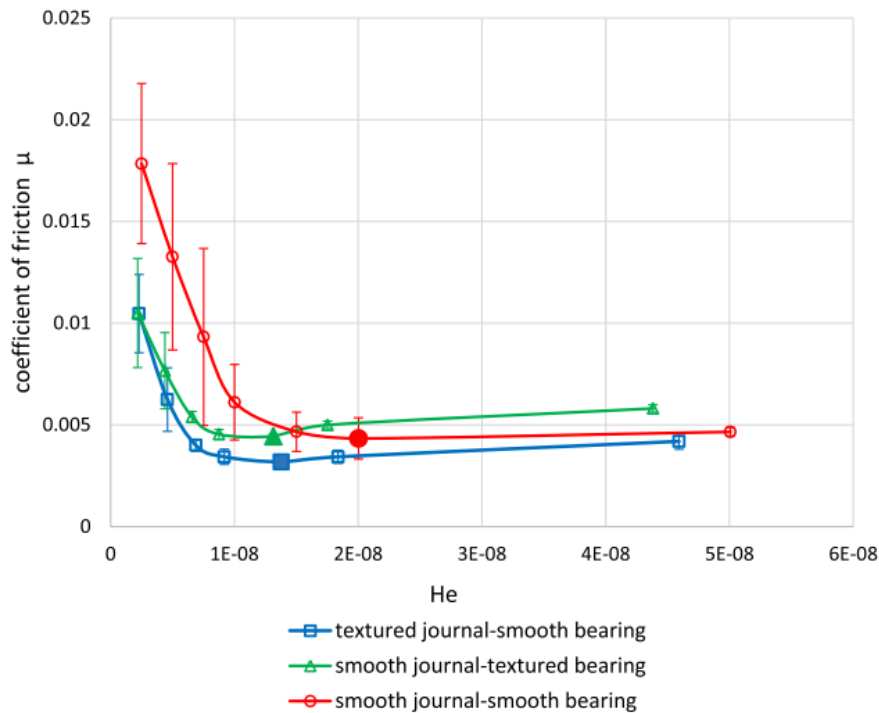


Figura 1.21: curva de Stribeck de los experimentos de Galda et Al [41]

Galda et Al [44] también hicieron experimentos para investigar el efecto de la geometría de las texturas. Por una parte, realizaron ensayos block-on-ring donde se grabaron varias texturas con forma de *dimples* y con formas alargadas, como se puede ver en la Figura 1.22. El anillo estaba fabricado con acero 42CrMo4 y el bloque con una fundición EN-GJS 400-15. Los ensayos se hicieron con una carga normal de 1,4 kN con un rango de velocidades de deslizamiento entre 0,08-0,69 m/s. Obtuvieron resultados poco claros ya que no obtuvieron un valor mínimo para el coeficiente de fricción. No obstante, el empleo de una densidad de texturas del 20% generó un aumento de la fricción respecto a otras densidades de texturizado, y la presencia de texturas en general disminuyó el coeficiente de fricción. Este aumento del coeficiente de fricción con altas densidades de texturas se debe a que se produce una disminución del área de contacto y un aumento de la presión. Esto favorece la dispersión de la capa de fluido, por lo que es importante cuidar este aspecto en el caso de texturizado de superficies concordantes. El segundo tipo de texturas fue el menos efectivo ya que la reducción de área es mayor en comparación con los efectos del texturizado. Pawlus et Al [45] realizaron ensayos similares incluyendo artificialmente partículas abrasivas en el lubricante, obteniendo unos valores óptimos en cuanto a disminución del desgaste en el caso del empleo de *dimples* con una densidad de texturas de 12,5%.

El efecto beneficioso que las texturas tienen en el régimen de lubricación hidrodinámico se debe a que las texturas generan una distribución de presión asimétrica dentro de la capa de fluido. En las zonas convergentes se genera una presión positiva que aumenta la capacidad del fluido de soportar la carga, evitando su dispersión y garantizando un cierto espesor de capa [46].

Koszela et Al [47] también realizaron ensayos tribológicos block-on-ring empleando pares tribológicos acero-bronce. Los anillos estaban fabricados de acero 42CrMo4, se realizó los ensayos a una velocidad de 0,27 m/s y se empleó como lubricante aceites minerales con partículas abrasivas añadidas intencionadamente. Se grabaron además *dimples* mediante bruñido. Obtuvieron unos mejores resultados en cuanto a resistencia al desgaste en la muestra no texturizada. Concluyeron que este resultado se debe a varios factores, incluyendo un

aumento de la presión de contacto con relación a la disminución de área y a un diseño incorrecto de las texturas. Al finalizar los ensayos descubrieron que los *dimples* estaban completamente llenos de partículas abrasivas y restos de bronce. Esto favoreció también que se produjera una fijación mecánica de abrasivos en el bloque de bronce, aumentando el desgaste del acero.

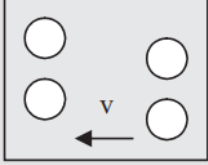
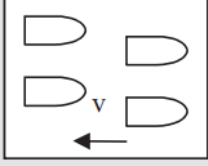
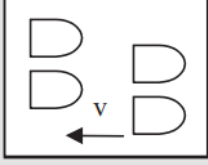
Sample no.	Scheme of shape and arrangement	Dimensions
1. Oil pockets area density S 7.5, 10, 12.5, 15, 20%		Depth = 60 μm diameter = 900 μm
2. Oil pockets area density S 7.5, 10, 12.5, 15, 20%		Depth = 55 μm length = 1600 μm width = 500 μm
3. Oil pockets area density S 10, 15, 20%		Depth = 60 μm length = 800 μm width = 800 μm
4. Ground	Ra = 0.32 μm	

Figura 1.22: texturas de los experimentos de Galda et. al [44]

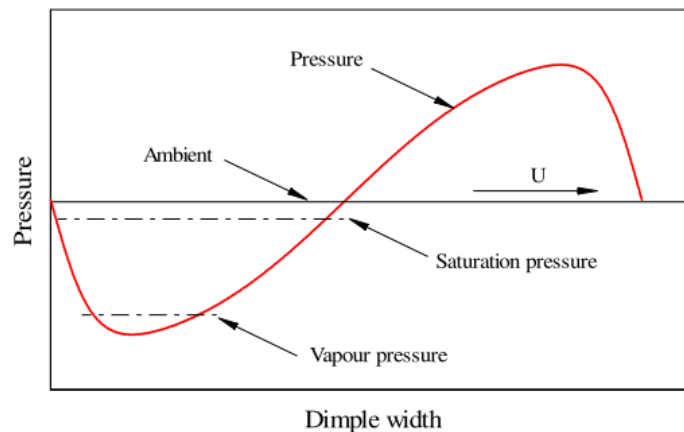


Figura 1.23: distribución asimétrica de presiones [46]

Saedi et. al [48] realizaron ensayos similares empleando acero contra fundición gris, texturizando la fundición con un láser de nanosegundo. Las texturas tenían forma de pequeñas ranuras con diferente profundidad, diámetro, longitud, densidad y orientación. Los ensayos se llevaron a cabo en un tribómetro pin-on-flat en condiciones de lubricación marginal. Obtuvieron que el coeficiente de fricción no se veía muy afectado por el texturizado, pero a pesar de ello mejoraba. Descubrieron que el diámetro de las texturas era un parámetro muy influyente, ya que texturas muy grandes aumentaban el coeficiente de fricción. La orientación también tiene cierta influencia ya que es capaz de modificar el movimiento del lubricante entre las superficies. La profundidad de las texturas también es importante, ya que texturas profundas disminuyen el

desgaste abrasivo (ya que atrapan las partículas abrasivas que pueden existir entre superficies) pero aumenta el coeficiente de fricción, al atrapar también el escaso lubricante que existe.

Braun et Al [49] realizaron ensayos pin-on-flat con superficies de acero texturizadas con *dimples* de diferente tamaño, densidad de texturas contantes y relación entre profundidad y diámetro constante en condiciones de lubricación parcial. Concluyeron que el tamaño óptimo de los *dimples* en estas condiciones respecto a la disminución del coeficiente de fricción depende de otros parámetros, como las propiedades y temperatura del lubricante y de las condiciones en las que se produce el deslizamiento.

Hu et Al [1] investigaron la optimización de la lubricación mediante *dimples* en el aluminio 2024. Es una aleación difícil de lubricar debido a sus propiedades fisicoquímicas y bastante susceptible al desgaste. Grabaron una serie de *dimples* con un láser de nanosegundo y posteriormente hicieron una serie de ensayos flat-on-disc recíprocos, en condiciones de lubricación marginal. Obtuvieron una mejora del coeficiente de fricción y del desgaste, especialmente con una densidad de *dimples* de 8,5%.

Vilhena et Al [50] hicieron también ensayos flat-on-disc en aleaciones de acero, grabando *dimples* con diferentes densidades de texturas y diferentes profundidades bajo lubricación, obteniendo buenos resultados solo a altas velocidades y profundidades superiores a 16,5 μm .

Qiu et. al [51] realizaron ensayos en los que dos placas de acero inoxidable rozaban entre sí, estado una de ellas texturizadas con *dimples*. Obtuvieron mejoras en el coeficiente de fricción con las placas texturizadas, y observaron que la diferencia entre fricción con placas texturizadas y completamente lisas era mayor cuando se empleaban cargas pequeñas. También observaron que una relación profundidad-diámetro en torno a 0,1 mejoraba el comportamiento de las texturas. No obstante, obtuvieron mayores valores para el desgaste de estos componentes cuando emplearon probetas texturizadas, sugiriendo que los parámetros de diseño de las texturas interaccionan entre ellos de una manera compleja.

Zenebe Segu et Al [52] realizaron ensayos flat-on-disc empleando acero, con unos discos en los que se grabaron texturas de diferente morfología. Obtuvieron para todas ellas mejoras en cuanto al coeficiente de fricción y al desgaste en comparación con unas muestras sin texturizar.

Henry et Al [42] hicieron ensayos en cojinetes de empuje texturizados, en este caso, con pequeñas texturas rectangulares. Los materiales empleados en este estudio fueron acero contra bronce. Obtuvieron, al igual que los autores anteriormente mencionados, unas mejoras para el rozamiento durante los periodos de arranque parada, ya que el régimen de lubricación en estos casos es marginal o parcial. Obtuvieron unos valores óptimos con una profundidad de texturas de 5 μm y una densidad del 56%, además, consiguieron adelantar el alcance del régimen de lubricación hidrodinámica.

Se puede observar en los estudios citados que el texturizado láser funciona como método de optimización de las propiedades tribológicas de las superficies. El diseño de un texturizado correcto, en función de la aplicación, de la geometría y de los materiales de los componentes implicados garantiza una mejor lubricación, con un mayor espesor de capa, así como una disminución en la fricción. El desgaste también se ve disminuido, al reducirse la interacción entre las asperezas de las superficies y el efecto de atrapamiento de partículas potencialmente abrasivas que puedan estar atrapadas en la interfase. Estos beneficios provienen de un atrapamiento de las partículas abrasivas generadas durante el deslizamiento, de la actuación de

las texturas como reservas de lubricante, y de una mejora de la capacidad de carga de la película de fluido gracias a incrementos locales de la presión del lubricante en los bordes de las texturas.

La aleación de aluminio UNS A92024, debido a su baja dureza, tiene muy limitadas sus aplicaciones en componentes mecánicos, incluso bajo presiones de contacto relativamente bajas. Por lo tanto, mediante el diseño de un texturizado correcto, sus aplicaciones pueden extenderse a la fabricación de componentes mecánicos ligeros sometidos a presiones de contacto superiores a las admitidas por la aleación sin texturizar.

Capítulo 2 . Metodología experimental

2.1 Introducción

El procedimiento experimental empleado se divide en tres fases principales: preparación de las probetas, realización de ensayos y evaluación de resultados. La preparación de las probetas consta de varias fases, en las que se cortan, se preparan superficialmente y se texturizan. En la segunda fase, se llevan a cabo los diversos ensayos y se toman las medidas necesarias para concluir la efectividad del texturizado, incluyendo una evaluación superficial de la rugosidad de las texturas, recopilación del coeficiente de fricción y análisis del desgaste producido durante el proceso. En la Figura 2.1 puede observar un diagrama de flujo en el que se resume el procedimiento experimental:

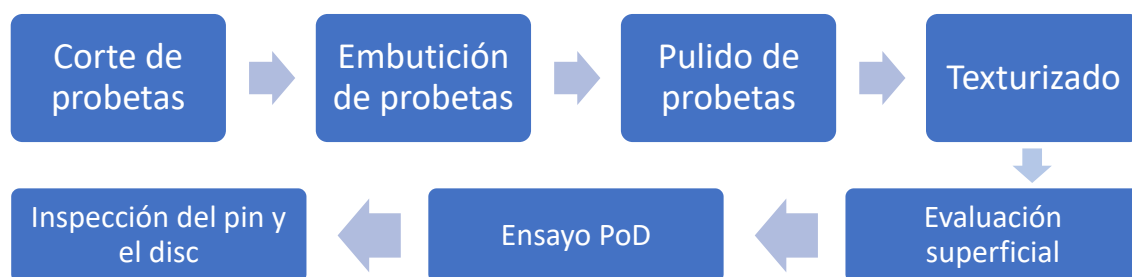


Figura 2.1: diagrama de flujo del procedimiento experimental

Los parámetros y empleados en los ensayos y la secuencia de operaciones se han seleccionado en función de otros estudios similares. En los siguientes apartados, se describe con más detalle el procedimiento experimental.

2.2 Preparación de probetas

Para la fabricación y preparación de probetas se parte de unas planchas de una aleación de aluminio UNS A92024-T3 de 5 mm de espesor. Se corta mediante WaterJet quince discos de 20 mm de diámetro.

Estos discos posteriormente se embuten en una resina termoplástica DuroFast empleando una prensa automática LaboPress-3. Los parámetros empleados en este proceso los puede encontrar en la Tabla .

Tabla 2.1: parámetros de la prensa automática

Cantidad de polímero (mL)		45
Calentamiento	Temperatura (°C)	180
	Tiempo (min)	4
	Fuerza (kN)	30
Enfriamiento	Tiempo (min)	4



Figura 2.2: a) Prensa automática Struers LaboPress -3. b) Probetas antes de la embutición

A continuación, se pasa a pulir las probetas para conseguir una rugosidad $Ra \leq 0,8 \mu m$. Para ello se emplea una serie de papeles abrasivos de SiC #800, #1200 y #2400 en una pulidora Struers TegraPol-11. En este proceso se empleó una velocidad de giro de 30 rpm y una fuerza de 15 N.



Figura 2.3: Pulidora Struers TegraPol-11

A continuación se procede a realizar una verificación de la rugosidad de la superficie, siguiendo la norma UNE-EN-ISO 4288:1998. Para ello se emplea un rugosímetro Mahr Perthometer y se toman varias medidas de la rugosidad de las probetas, con un $\lambda_c = 0,8$ y una longitud de evaluación igual a cinco veces la longitud de corte. Se observa que todas las probetas poseen una rugosidad $Ra = 0,03 \mu m$. Esta rugosidad es inferior al valor de $0,8 \mu m$ recomendado por la norma ASTM G99-17 [53].



Figura 2.4: verificación de la rugosidad de las probetas

2.3 Texturizado de las probetas

Tras verificar la rugosidad de las probetas pulidas, se procede a grabar las texturas en ellas. Para ello se emplea una grabadora láser de milisegundo Rofin Easymark con un diámetro spot de $60 \mu m$. Los parámetros empleados son los que, mediante pruebas previas realizadas en esta misma universidad, generan una superficie con una mayor Ra y Rz . Estos parámetros se encuentran en la Tabla 2.2. El texturizado no se realizó en atmósfera protectora. Se empleó el software suministrado por el propio fabricante del equipo.

Se grabaron dos tipos de texturas: circulares concéntricas y lineales, en forma de red. Para cada tipo se grabaron dos variantes, una de ellas con una separación entre texturas de 1 mm y otra con una separación de $0,8 \text{ mm}$. En el caso de las circulares, esta separación se refiere a la diferencia de los diámetros de las distintas texturas. Se grabaron tres probetas con cada tipo de textura, y tres no se texturizaron. Los ensayos se repetirán tres veces por cada tipo de textura con el fin de comprobar la repetibilidad y disminuir posibles errores. En la Tabla 2.3 y en las Figura 2.6 y 2.7 puede ver el diseño de las diferentes texturas.

Tras el grabado de las probetas, se procede nuevamente a obtener datos de la rugosidad de las texturas grabadas, también con un $\lambda_c = 0,8$ y una longitud de evaluación de $5,6 \text{ mm}$ bajo la norma UNE-EN-ISO 4288:1998.

Tabla 2.2: parámetros del texturizado láser

Potencia	20 W
Frecuencia	80 kHz
Velocidad de escaneo	10 mm/s

Tabla 2.3: geometría de las texturas grabadas en las probetas

Probeta	Patrón de textura	Distancia entre texturas (mm)
1-2-3	Concéntrico	0,8
4-5-6	Concéntrico	1
7-8-9	Lineal	0,8
10-11-12	Lineal	1
13-14-15	Sin texturas	-



Figura 2.5: grabadora láser Rofin Easymark

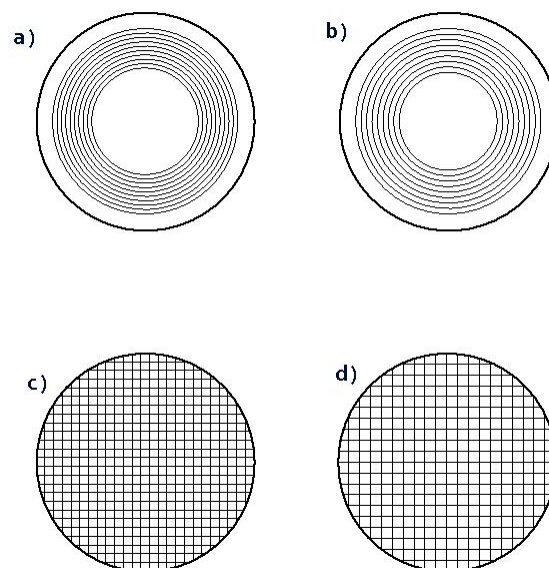


Figura 2.6: texturas empleadas. a) circular 0,8 mm; b) circular 1 mm; c) lineal 0,8 mm; d) lineal 1 mm

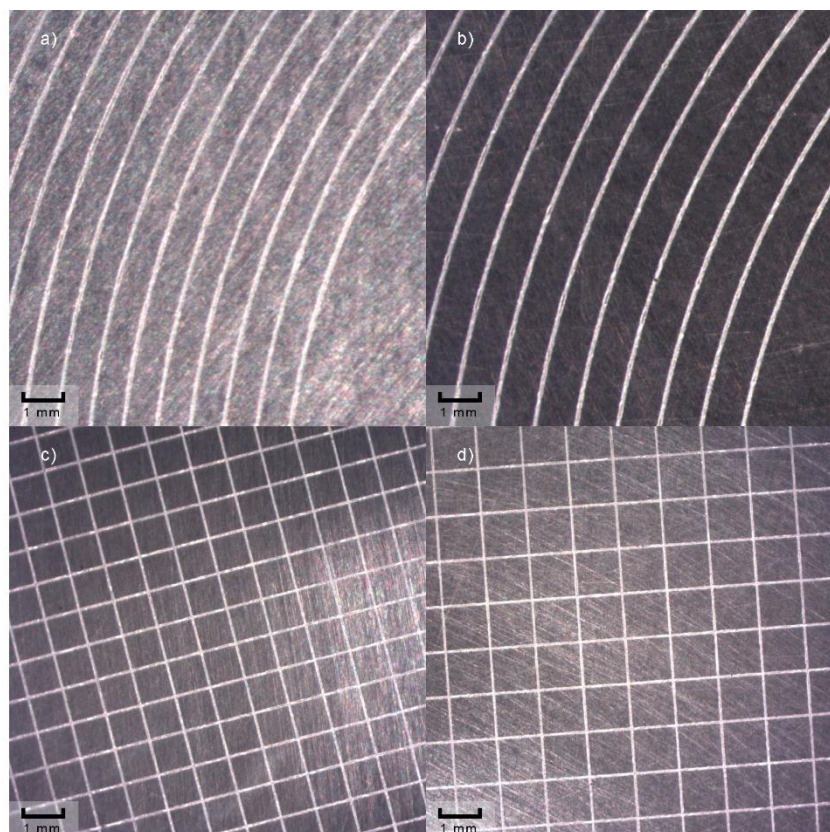


Figura 2.7: fotografías de las texturas. a) circular 0,8 mm, b) circular 1 mm, c) lineal 0,8 mm, d) lineal 1 mm.

2.4 Ensayos pin-on-disc e inspección de los pines y los discs

Los ensayos tribológicos consistieron en unos ensayos pin-on-disc. Estos ensayos consisten en deslizar un material fijo, llamado pin, contra uno móvil, llamado disc, bajo la acción de una fuerza normal al disc. Se tratan de unos ensayos más usuales para la medición de la fricción y desgaste [54]. Se empleó como pin una esfera de acero tipo inoxidable de 3 mm de diámetro, y las probetas previamente texturizadas como disc. El equipo empleado es un tribómetro Microtest MT/60/Ni, que cuenta con una velocidad máxima de giro de 500 rev/min, un radio de fricción de 40 mm y una capacidad de carga máxima de 60 N. En cada probeta se realizan dos ensayos, uno en seco y otro empleando un lubricante Renolin MR 3 VG 10 en condiciones de lubricación marginal. Los parámetros empleados en los ensayos se encuentran en la Tabla 2.4. Estos ensayos se llevaron a cabo a una temperatura ambiental de 20 °C. Se empleó el Software MT 4002, suministrado por el propio fabricante. Cada ensayo para un tipo de geometría concreto se realizó por triplicado, con el objetivo de disminuir los posibles errores. Tras la realización de cada ensayo, las probetas y los pines fueron sometidas a una inspección óptica con un microscopio Nikon SMZ800, empleando una magnificación X1, con el fin de analizar el posible desgaste de los componentes.

Tabla 2.4: parámetros de los ensayos pin-on-disc

Velocidad de deslizamiento	150 mm/s
Radio de giro	11 mm, 13 mm
Carga normal	3N
Longitud de ensayo	45 m

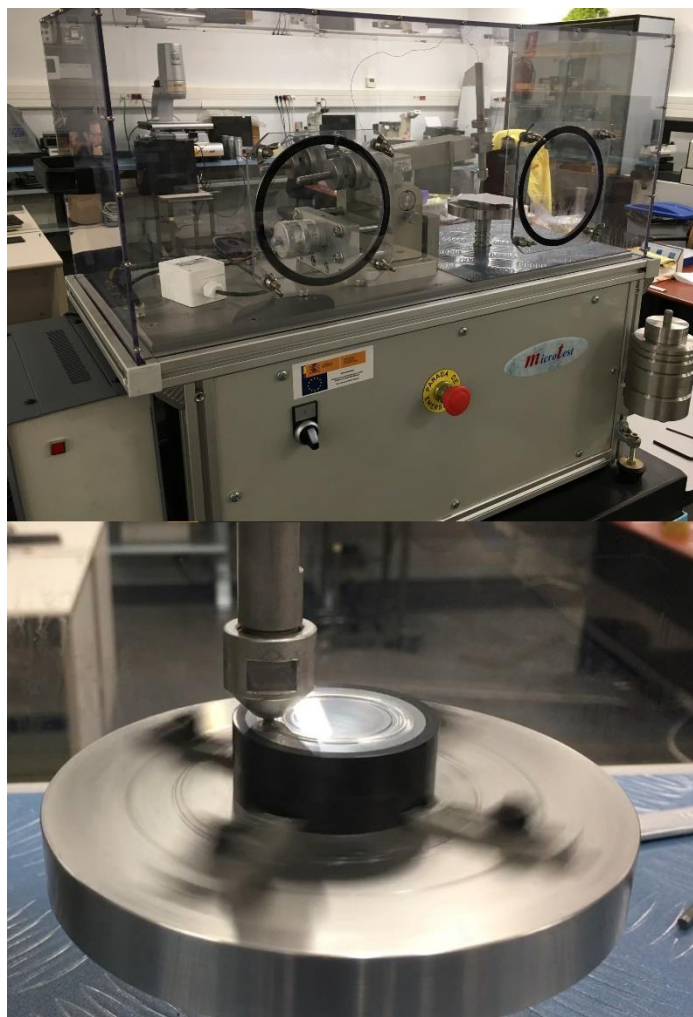


Figura 2.8: Tribómetro Microtest MT/60/Ni (arriba). Detalle del ensayo (abajo)

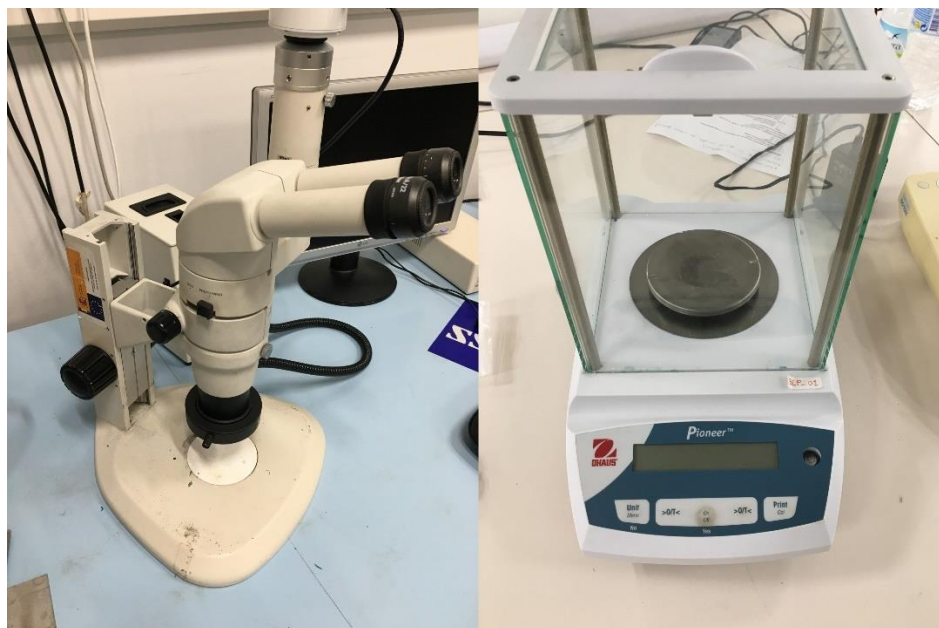


Figura 2.9: Microscopio Nikon SMZ800 y balanza electrónica Ohaus Pioneer PA214

Además, los pines se pesaron antes y después de la realización de los ensayos con una balanza electrónica Ohaus Pioneer PA214 con una resolución de 0,0001 g. De esta forma se pretende evaluar la variación de masa debida a la adhesión de aluminio. En el caso del disc, se empleará la siguiente ecuación, según la norma ASTM G99-17 [53]:

$$\Delta V = \frac{\pi R d}{6r}$$

Donde r es el radio del pin y R y d el radio y el ancho del surco generado por el desgaste. La medida del radio del surco se realiza mediante el uso de las imágenes obtenidas de los disc con el microscopio y del software de medición en imágenes ImageJ.

Capítulo 3 Resultados y Discusión

3.1 Introducción

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos tras realizar el anterior procedimiento experimental. Por una lado, se analizará si el proceso de texturizado ha sido satisfactorio desde el punto de vista microgeométrico y si se han conseguido generar las texturas deseadas con éxito, y las probetas son aptas para realizar en ellas ensayos pin-on-disc según la norma ASTM G99-17. A continuación, se analizarán y discutirán los resultados obtenidos en cuanto al coeficiente de fricción promedio que se obtiene en las superficies texturizadas y el efecto de este texturizado en la magnitud del desgaste que sufrirán tanto los pines como los discs.

Para finalizar, se discutirán posibles líneas de investigación futuras en función de los resultados obtenidos, así como sintetizar las conclusiones más significativas que se hayan podido obtener.

3.2 Rugosidad de las probetas

Tras realizar las diferentes medidas de rugosidad, los valores de los parámetros Ra y Rz aparecen en la Tabla 3.1. En las Figura 3.1 y 3.2 puede observar un gráfico resumen de los parámetros de rugosidad Ra y Rz respectivamente.

Tabla 3.1: parámetros de rugosidad de las probetas

Probeta	Textura	TEXTURIZADO		SIN TEXTURIZAR	
		Ra	Rz	Ra	Rz
1	CONC 0,8	0,17	2,38	0,05	0,55
2	CONC 0,8	0,19	2,79	0,05	0,54
3	CONC 0,8	0,14	2,69	0,05	0,52
4	CONC 1	0,15	2,37	0,05	0,42
5	CONC 1	0,15	2,33	0,05	0,56
6	CONC 1	0,12	2,03	0,06	0,66
7	RECT 0,8	0,15	2,33	0,05	0,53
8	RECT 0,8	0,12	2,4	0,06	0,43
9	RECT 0,8	0,15	2,65	0,05	0,59
10	RECT 1	0,13	2,63	0,06	0,47
11	RECT 1	0,11	1,52	0,05	0,58
12	RECT 1	0,13	2,37	0,05	0,51
13	-	-	-	0,06	0,41
14	-	-	-	0,05	0,46
15	-	-	-	0,06	0,48

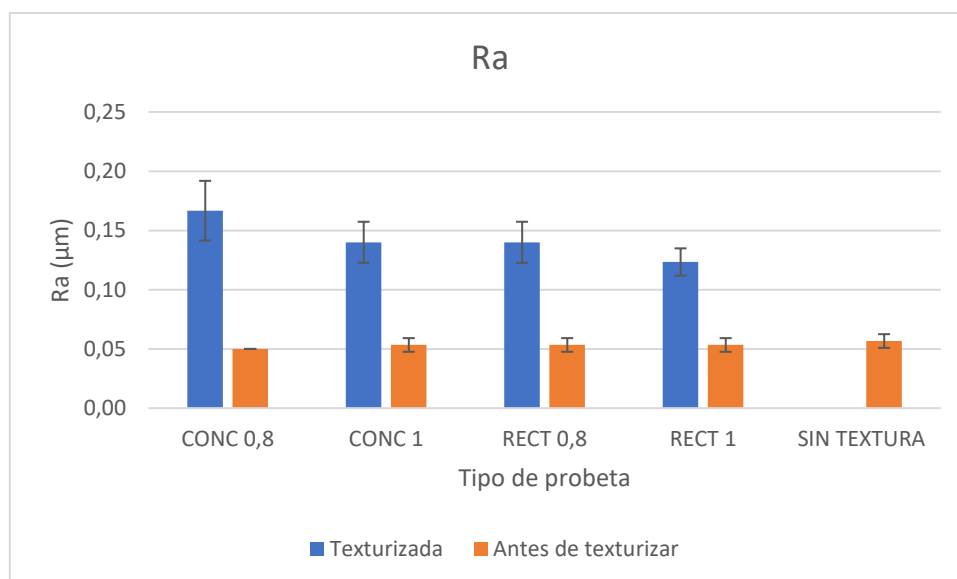


Figura 3.1: Ra de las probetas

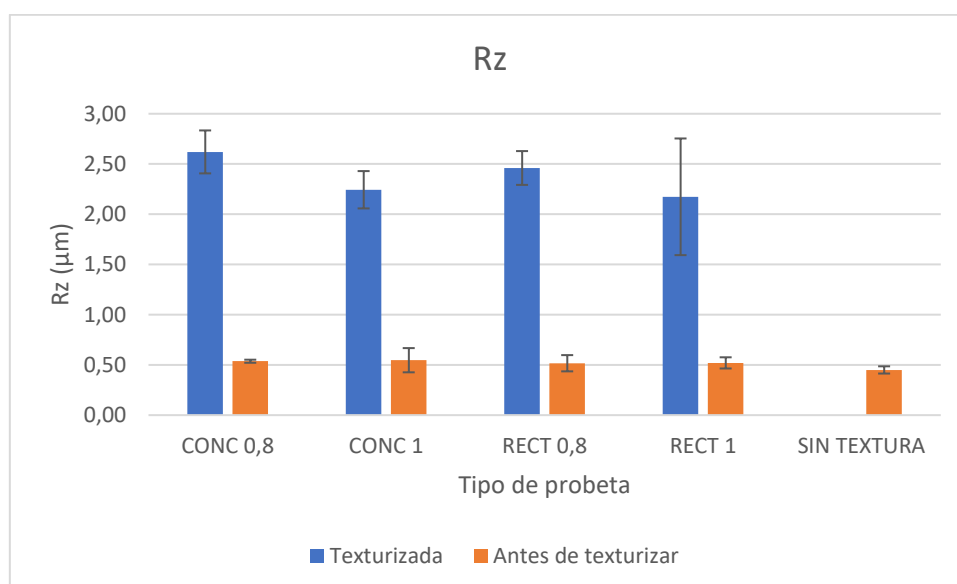


Figura 3.2: Rz de las probetas

Se observa un notable incremento de la rugosidad en las probetas tras el texturizado. Este resultado es esperable, ya que los parámetros empleados en el texturizado de las probetas fueron aquellos que maximizaban los valores de los parámetros de rugosidad Ra y Rz, según varias pruebas previas realizadas en esta misma universidad.

También se aprecia una sutil variación entre los valores de Ra en el caso de las probetas antes de texturizar. Esta variación puede ser debida al propio proceso de pulido, ya que es posible que durante la limpieza de las probetas tras retirarlas de la máquina se alterara la superficie, o por el rozamiento entre probeta y probeta durante su transporte y almacenaje.

Además, los datos obtenidos en la caracterización superficial de las probetas no solo revelan un incremento en su rugosidad, sino también se observa la aparición de rebabas en el borde de las

texturas. Estas rebabas, como se menciona en el Capítulo 1, se deben a una solidificación del material vaporizado instantes después del proceso de ablación. Estas rebabas se han formado, de manera muy similar, en todas las probetas. En la 3.3 se observa, a modo de ejemplo, el perfil R de la probeta N°10, con las distintas rebabas en torno a las texturas.

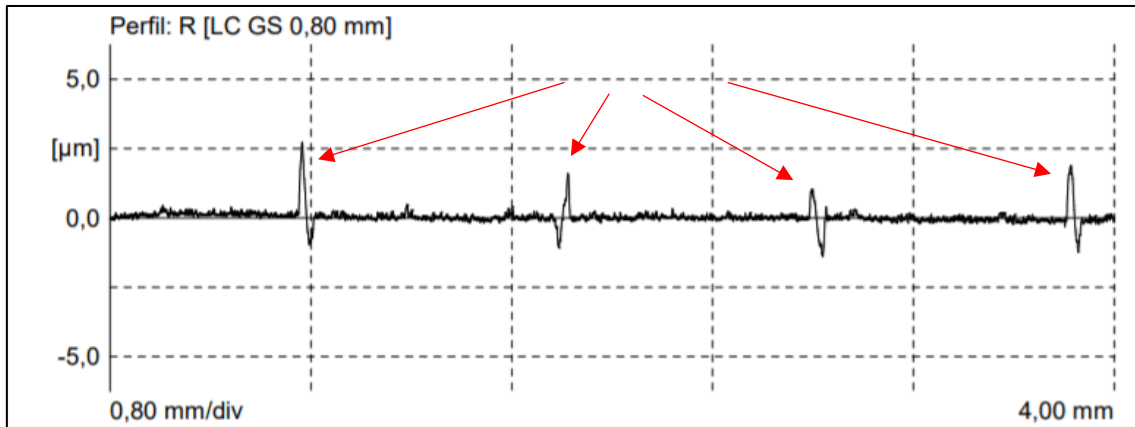


Figura 3.3: perfil R de la probeta N° 10

También se observa, que la profundidad de las texturas se sitúa en torno a $1\ \mu\text{m}$ para todas las probetas ensayadas. Su profundidad se puede estimar como la mitad del valor del parámetro R_z , ya que los picos y los valles más grandes se producen precisamente debido a las texturas y a las rebabas adyacentes, además, observando los perfiles R se aprecia su valor. Esta profundidad es pequeña en comparación a otros estudios relacionados con esta temática y resultados satisfactorios citados en la introducción, cuya profundidad era de un orden diez veces superior. La profundidad de las texturas es un parámetro importante, ya que condiciona su capacidad de atrapar partículas abrasivas y de engrosar la capa de fluido. Se espera, por lo tanto, que su efecto sea inferior al deseado.

3.3 Coeficiente de fricción

Tras realizar los diversos ensayos Pin-on disc, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 3.2 y en Figura 3.4 para los distintos tipos de texturas. Los valores presentados se corresponden a la media de los tres ensayos efectuados por cada tipo de textura

Se observa que el efecto de las texturas es muy pequeño. El coeficiente de fricción promedio no muestra una mejoría respecto al obtenido en la probeta sin texturizar en ninguno de los casos. En el caso del texturizado en seco, podría deberse a la poca profundidad de las texturas y a la rápida destrucción de las mismas, que minora su efecto beneficioso. En el caso de las probetas concéntricas, era de esperar ya que no se producen muy pocos cruces entre la trayectoria del pin y las texturas (sólo se producen debido a pequeños fallos de concentricidad entre el eje de giro del tribómetro y el centro de las texturas al posicionarlas), momento donde se producen los efectos beneficiosos del texturizado láser en la fricción en seco.

Tabla 3.2: coeficiente de fricción promedio

COEFICIENTE DE FRICCIÓN				
	Media		Desviación típica	
	Seco	Lubricado	Seco	Lubricado
CONC 0,8	0,17	0,13	0,03	0,06
CONC 1	0,18	0,12	0,07	0,02
RECT 0,8	0,16	0,12	0,06	0,03
RECT 1	0,18	0,16	0,05	0,03
SIN TEXTURA	0,17	0,10	0,03	0,03

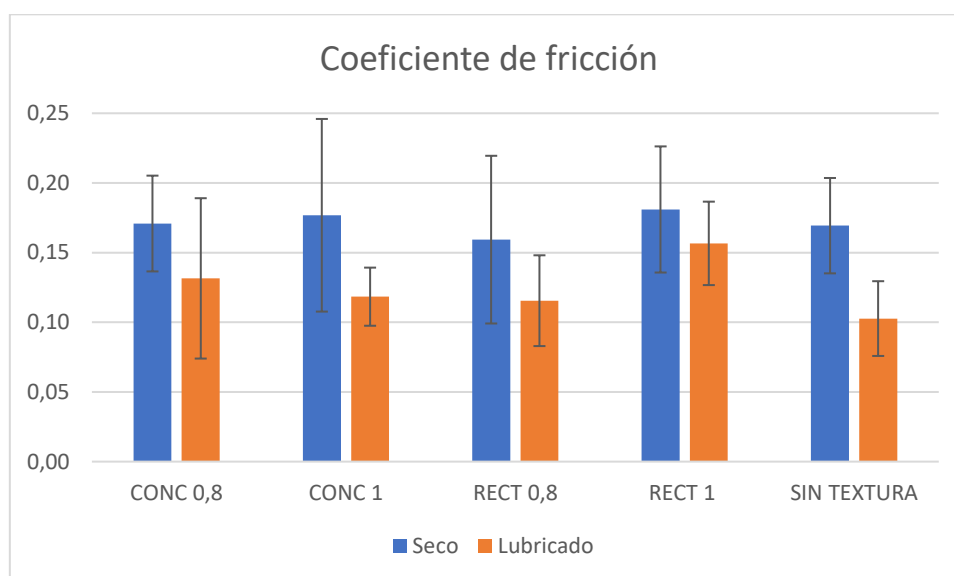


Figura 3.4: coeficiente de fricción promedio

No obstante, en la probeta con el texturizado rectangular de 0,8 mm se observa una mejora, muy sutil, pero existente, del coeficiente de fricción. Una posible razón puede ser un atrapamiento de dichas partículas abrasivas, así como del material adherido al pin. A pesar de que las evidencias muestran que no son los diseños de textura más correctos, no se puede descartar por completo su posible efecto, y parece que esta combinación es la que más se acerca a la óptima. Las probetas con el texturizado rectangular generan más cruces entre la trayectoria del pin y las texturas, lo que permite «limpiar» el pin de partículas abrasivas y adheridas. Sin embargo, se observa que el texturizado rectangular con una separación de 1 mm aumenta el coeficiente de fricción. Puede ser debido a una disminución de los efectos beneficiosos de las texturas conforme se separan sumado a un entorpecimiento del deslizamiento por los cruces entre texturas y la trayectoria del pin.

En líneas generales, para los ensayos realizados en seco se pueden obtener como conclusiones generales que la presencia de rebabas, el empeoramiento de la calidad superficial y unas texturas poco profundas, han mitigado los efectos positivos de las texturas. Además, la diferencia de dureza entre ambos materiales hace que estas texturas se borren rápidamente debido al desgaste temprano. Sin embargo, se observa también una mayor dispersión en los resultados obtenidos. Esto quiere decir que en momentos puntuales se alcanzaron valores más bajos del coeficiente de fricción, lo cual puede ser debido a que las texturas estén reteniendo efectivamente partículas generadas por el desgaste. No obstante, no se puede afirmar que

exista una mejora considerable del coeficiente de fricción a pesar de que puntualmente se hayan obtenido valores bajos de forma puntual.

En los ensayos realizados en presencia de lubricante, se observa una mejora del coeficiente de fricción respecto a los ensayos realizados en seco dentro de cada probeta, como se esperaba. En este caso, sin embargo, se observa que las texturas empeoran el coeficiente de fricción respecto a la probeta no texturizada al obtenerse valores más elevados del mismo para los ejemplares texturizados. Esto puede deberse debido al aumento de rugosidad dentro de las superficies texturizadas, así como a una contribución a la dispersión de la capa de fluido. En la literatura científica, gran parte de los estudios en los que se obtienen mejoras del coeficiente de fricción fruto de un incremento del espesor de capa se consigue con el empleo de dimples (que confinan al lubricante) y superficies concordantes (que generan presiones de contacto más bajas y se producen incrementos locales de la presión del lubricante en los bordes de las texturas). En este caso, se producen grandes presiones de contacto debida a la reducida área entre la bola y el disco, junto a unas texturas que podrían estar actuando como canales. Una dispersión de la capa de fluido y el empeoramiento de la calidad superficial, junto a un entorpecimiento del deslizamiento por los cruces con las texturas, puede ser la razón del incremento del coeficiente de fricción para las probetas texturizadas, de forma similar a los resultados que obtuvieron Kovalchenko et Al [38] y Costa et Al [39]. En este caso, tampoco podemos afirmar que se produzca una mejora significativa del coeficiente de fricción en las probetas texturizadas. En este caso, dentro de las series de probetas texturizadas, la probeta con el texturizado lineal de 0,8 mm de separación vuelve a ser la que mejores resultados presenta.

Se puede deducir que el principal efecto de las texturas ha sido el atrapamiento de partículas potencialmente abrasivas generadas durante el deslizamiento. En el caso de haber conseguido una optimización de la capa de fluido, se habría obtenido valores para el coeficiente de fricción de las probetas texturizadas en los ensayos lubricados inferiores a los obtenidos en las probetas sin texturizar. Como se ha mencionado en el párrafo anterior, esto puede ser debido a una dispersión de la película de fluido por efecto de la geometría de las texturas y de los metales en contacto.

El papel de las texturas como reservas de lubricante no es del todo claro tampoco. Se sabe que para conseguir este efecto, es importante cuidar la profundidad y la forma de las texturas ya que son parámetros de diseño influyentes [48]. Las texturas lineales con una separación de 0,8 mm muestran una profundidad mayor en comparación con las texturas lineales de 1 mm de separación, y presentan un coeficiente de fricción más bajo. Lo mismo sucede con las texturas circulares de 1 mm de separación en comparación con las circulares de 0,8 mm de separación. Estas diferencias de profundidad podrían mejorar el comportamiento de las texturas como reservas de lubricante. No obstante, para su validación o refutación sería conveniente realizar ensayos variando únicamente el espesor de las texturas.

También es preciso mencionar que se produce un fenómeno conocido como *stick-slip*. Al observar la representación gráfica del coeficiente de fricción respecto al tiempo, como las de la Figura 3.9 y la Figura 3.10, se observa que el coeficiente de fricción oscila constantemente. Esto es debido al deslizamiento sobre una superficie irregular, donde el pin se mueve sobre el disc dando pequeños saltos [4].

Podemos concluir el análisis del coeficiente de fricción afirmando que su optimización mediante el texturizado láser es un asunto muy complejo. Intervienen numerosas variables, y la aleatoriedad del proceso de fricción y desgaste hace que no sea fácil la creación de modelos o

de predicciones precisas. Podemos afirmar que estas texturas no son adecuadas si se persigue una disminución significativa del coeficiente de fricción, aunque queda demostrado su efecto beneficioso.

3.4 Desgaste

3.4.1 Desgaste en los pines

El desgaste, como se expuso en la metodología experimental, se ha evaluado tanto para el pin como para el disc. En la Tabla 3.3 y en la Figura 3.5 puede observar la variación de la masa en los pines calculada.

Tabla 3.3: variación de masa (en gramos) en los pines

Variación de masa en los pines (g)				
	Media		Desviación típica	
	Seco	Lubricado	Seco	Lubricado
CONC 0,8	0,0001	0,0002	0,0002	0,0000
CONC 1	-0,0001	0,0006	0,0003	0,0003
RECT 0,8	0,0000	0,0006	0,0003	0,0005
RECT 1	0,0003	0,0000	0,0002	0,0001
SIN TEXTURIZAR	0,0007	0,0006	0,0009	0,0002

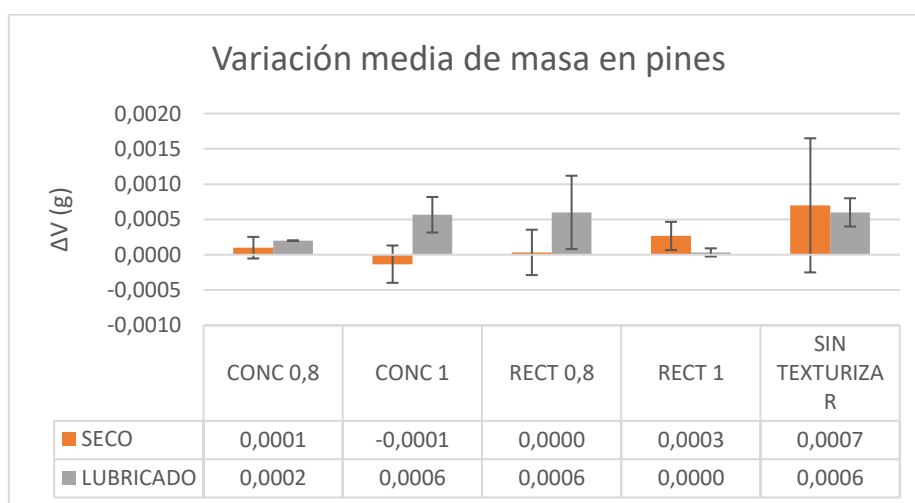


Figura 3.5: variación de masa (en gramos) promedio en los pines

Se puede observar que la variación es muy pequeña y presentan una alta dispersión. Al analizar los pines ópticamente, se observa que mantienen su geometría tras los ensayos, por lo que se puede afirmar que el desgaste que han sufrido es despreciable. Sin embargo, se ha observado que en los pines empleados en los ensayos en seco en las probetas número 2, 11, 12 y 15, las cuales corresponden a ensayos en seco, presentan adhesión de aluminio en su superficie. A la vista de los datos, sin embargo, se puede considerar que no se ha producido una adhesión al pin significativa tras la realización de los ensayos. En la Figura 3.6 se puede observar fotografías de los pines con material adherido.

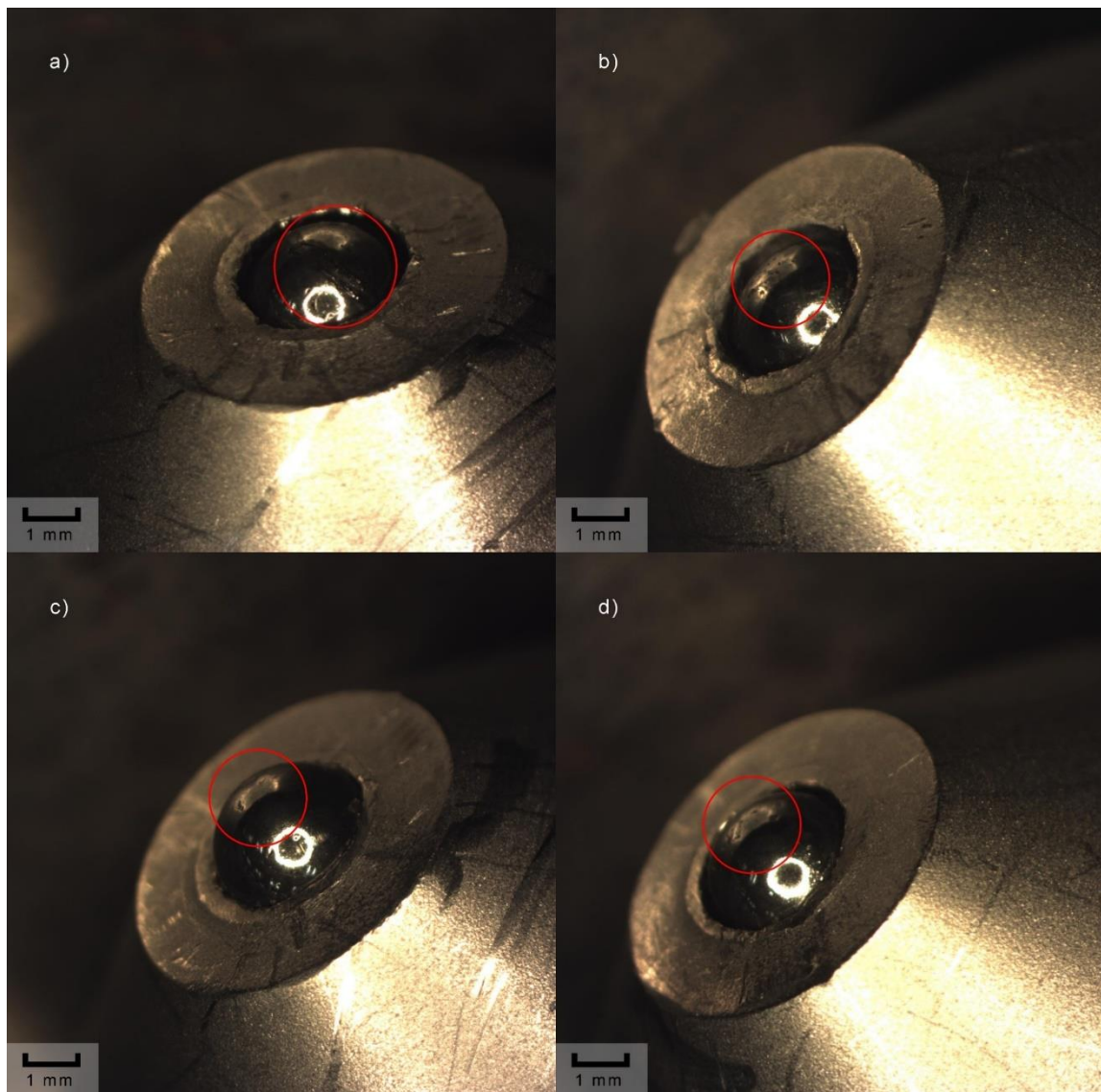


Figura 3.6: pines con material adherido. a) probeta N° 2, b) probeta N° 11, c) probeta N° 12, d) probeta N° 15

3.4.2 Desgaste en los discs

El desgaste en los discs se ha evaluado mediante inspección óptica, tal y como se ha mencionado en la Sección 2.4. En la Figura 3.8, se encuentran varias fotografías de la superficie de las probetas tras la realización de los ensayos, y en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.7 se encuentra el volumen del surco generado por el desgaste.

Como podemos observar, los mecanismos de desgaste predominantes en el deslizamiento en seco son la adhesión y la abrasión. En el caso de la adhesión se observa ya que existe acumulaciones extrañas de material (sobre todo en las intersecciones entre el surco de desgaste y las texturas) y una superficie «escamosa» en el surco.

Tabla 3.4: volumen del surco de desgaste en los discs

Volumen del surco generado por el desgaste (mm ³)				
	MEDIA		DESVIACIÓN TÍPICA	
	Seco	Lubricado	Seco	Lubricado
CONC 0,8	1,215	1,029	0,227	0,094
CONC 1	1,061	0,892	0,077	0,069
RECT 0,8	0,979	0,726	0,081	0,064
RECT 1	1,280	0,741	0,022	0,069
SIN TEXTURA	1,421	0,953	0,115	0,164

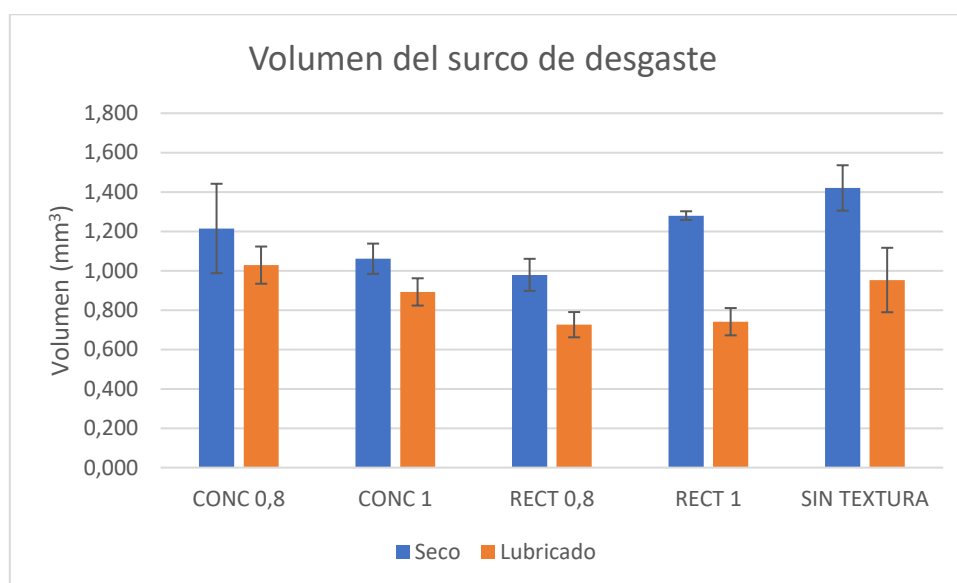


Figura 3.7: volumen del surco de desgaste en los discs

Esto indica que se ha producido un proceso cíclico de adhesión de aluminio al pin, y tras alcanzar un tamaño crítico, se desprende y vuelve a formar parte de la superficie del disc. Este comportamiento es típico en los pares aluminio acero [15]. Además, el hecho de que la transferencia de aluminio del pin a la superficie del disc se produzca en mayor medida en las inmediaciones de las texturas puede sugerir que su efecto abarca más allá de atrapar las partículas abrasivas, y pueden favorecer el desprendimiento del aluminio del pin. También se observan marcas en formas de arañazos sobre la superficie debidas a un proceso de desgaste abrasivo.

La elevada dureza del acero en comparación con la del aluminio, junto a una posible fijación mecánica de precipitados duros de la aleación de aluminio, pueden haber generado este tipo de desgaste. No obstante, se observa que su magnitud es muy pequeña en comparación con la del desgaste adhesivo, lo cual puede ser debido a la tendencia del aluminio a adherirse al acero y al efecto de las texturas de atrapar partículas potencialmente abrasivas generadas durante el deslizamiento. En el caso del deslizamiento lubricado, los restos de lubricante dificultan la interpretación de las fotografías, aunque parece que se produce una disminución notable del desgaste adhesivo y se observan ciertas marcas producidas por el desgaste abrasivo.

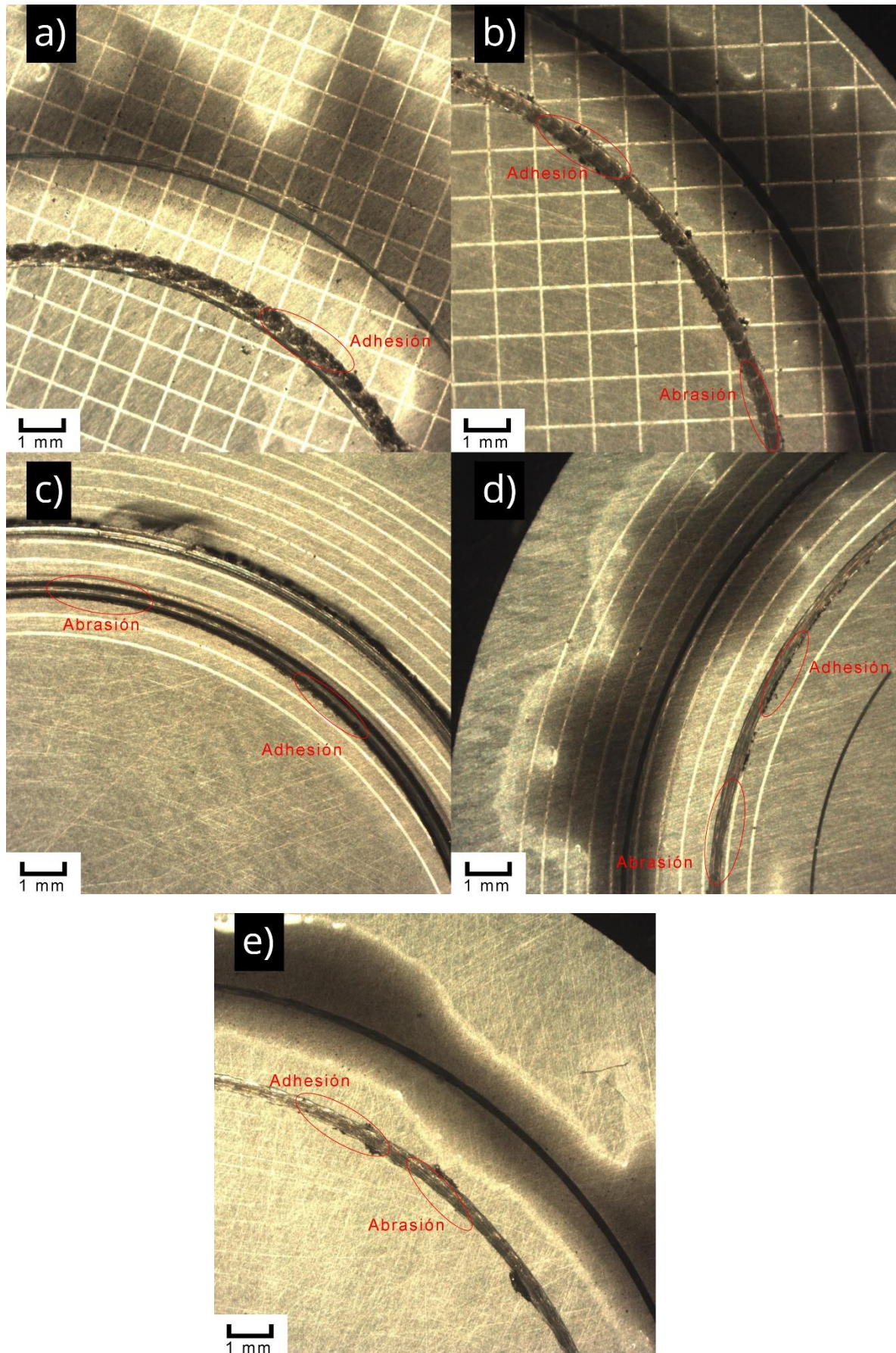


Figura 3.8: fotografías de las probetas tras los ensayos. a) lineal 0,8 mm, b) lineal 1 mm, c) circular 0,8 mm, d) circular 1 mm, e) sin texturizar

En cuanto al volumen del surco de desgaste, se puede observar que se aprecia una disminución del volumen del surco de desgaste en el caso de las probetas texturizadas. Las probetas con el texturizado rectangular de 0,8 mm de separación parecen ser nuevamente las que ofrecen un mejor resultado, al igual que con el coeficiente de fricción.

En este caso, se puede afirmar que las texturas han contribuido beneficiosamente a la reducción del desgaste, disminuyendo el volumen de material adherido al pin y atrapando parte de las partículas abrasivas generadas durante el proceso de fricción, disminuyendo así la magnitud del del desgaste en su conjunto. El resto de texturas parecen ser menos eficientes en este aspecto, lo cual tiene sentido debido al menor número de cruces entre las textura y el pin. Además, la mayor profundidad en promedio de esta serie de texturas contribuye a un mejor atrapamiento de dichas partículas y del aluminio adherido al pin.

Otra razón a la que puede deberse el comportamiento superior en cuanto a resistencia al desgaste de la probeta con el texturizado rectangular de 0,8 mm de separación es a un endurecimiento superficial producido durante el texturizado láser. El calor generado podría haber provocado tratamientos térmicos no controlados o una oxidación de las capas superiores de la probeta. Al ser la serie con una longitud de texturas mayor, este posible endurecimiento se habrá generado en mayor medida en esta serie de probetas. No obstante, cruzando los datos de resistencia al desgaste con los del coeficiente de fricción se observa una tendencia que puede estar más relacionadas con un atrapamiento más eficaz del aluminio adherido y de las partículas abrasivas generadas respecto a las demás texturas.

Además, la baja dureza del aluminio en comparación con el acero, sumado a la escasa profundidad de las texturas, provoca una destrucción de las mismas muy temprana en la zona de contacto. Este hecho es el principal limitante de la efectividad de las texturas. Esto se refleja en el coeficiente de fricción registrado durante los primeros instantes de los ensayos. En los ensayos llevados a cabo en seco, se observa una tendencia al incremento del coeficiente de fricción conforme aumenta el tiempo de ensayo en las probetas texturizadas, mientras que en las probetas no texturizadas se observa una tendencia a la disminución de dicho coeficiente. Esto puede indicar que el efecto beneficioso de las texturas podría ser mayor, pero su temprana destrucción limita dichos efectos generando coeficientes de fricción más altos. En la Figura 3.9 puede observar la evolución del coeficiente de fricción con el tiempo para las probetas número 8 y 13 donde se aprecia este efecto. En el caso de los ensayos lubricados ocurre un fenómeno similar. No obstante, la tendencia está menos marcada que en el caso de los ensayos llevados a cabo en seco, debido al menor desgaste y más lento producido por acción del lubricante. En la Figura 3.10 puede encontrar la evolución del coeficiente de fricción para las mismas probetas durante los ensayos con lubricación.

3.5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

Como se ha podido observar, la optimización de las propiedades tribológicas de los materiales mediante el uso del texturizado láser es un campo de estudio muy interesante debido a sus aparentes beneficios en relación con el coste del proceso. Sin embargo, también se puede comprobar que es un fenómeno muy complejo, en el que intervienen numerosas variables con una influencia en el resultado final difícil de predecir.

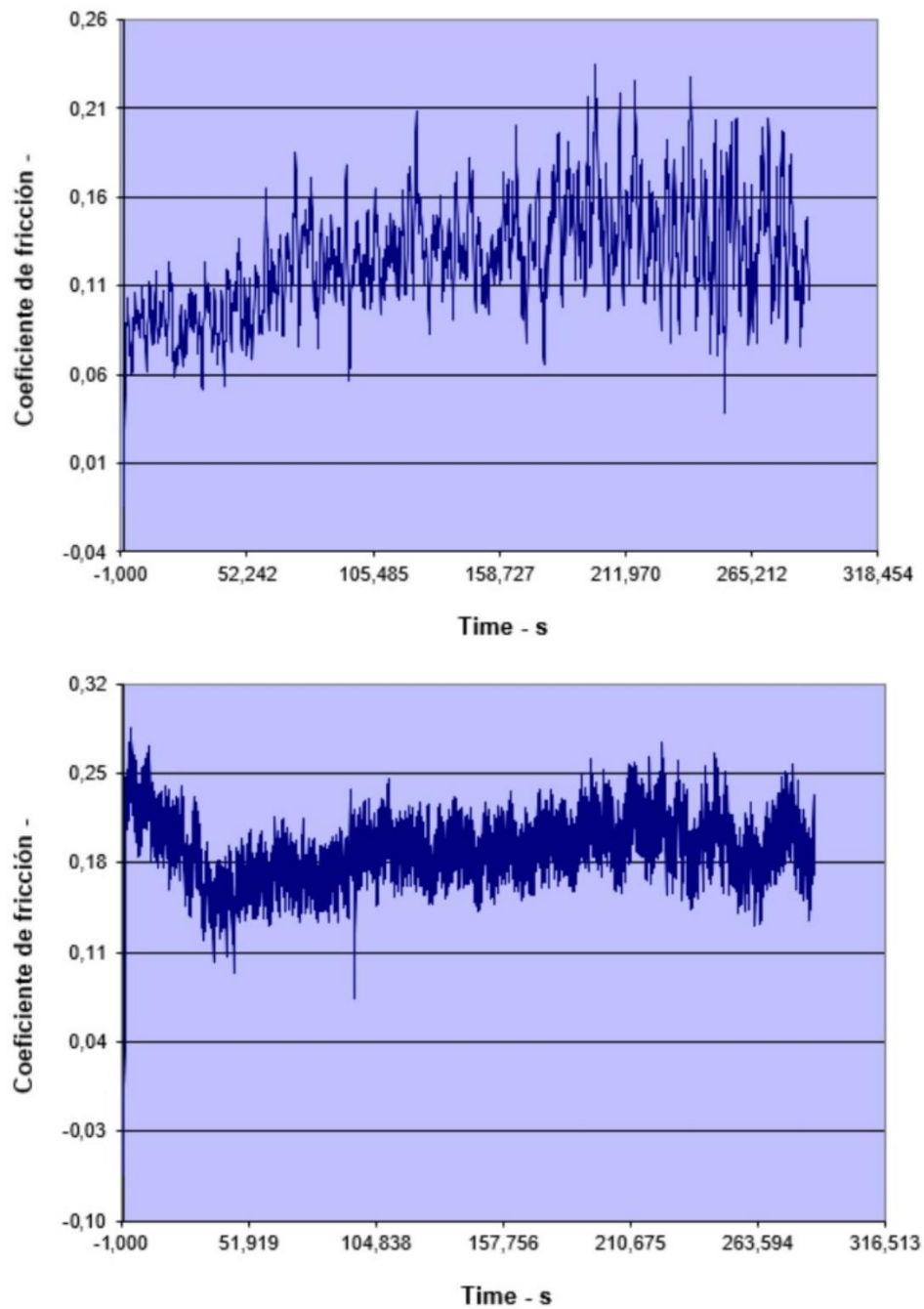


Figura 3.9: evolución del coeficiente de fricción en seco en probetas texturizadas (arriba) y no texturizadas (abajo)

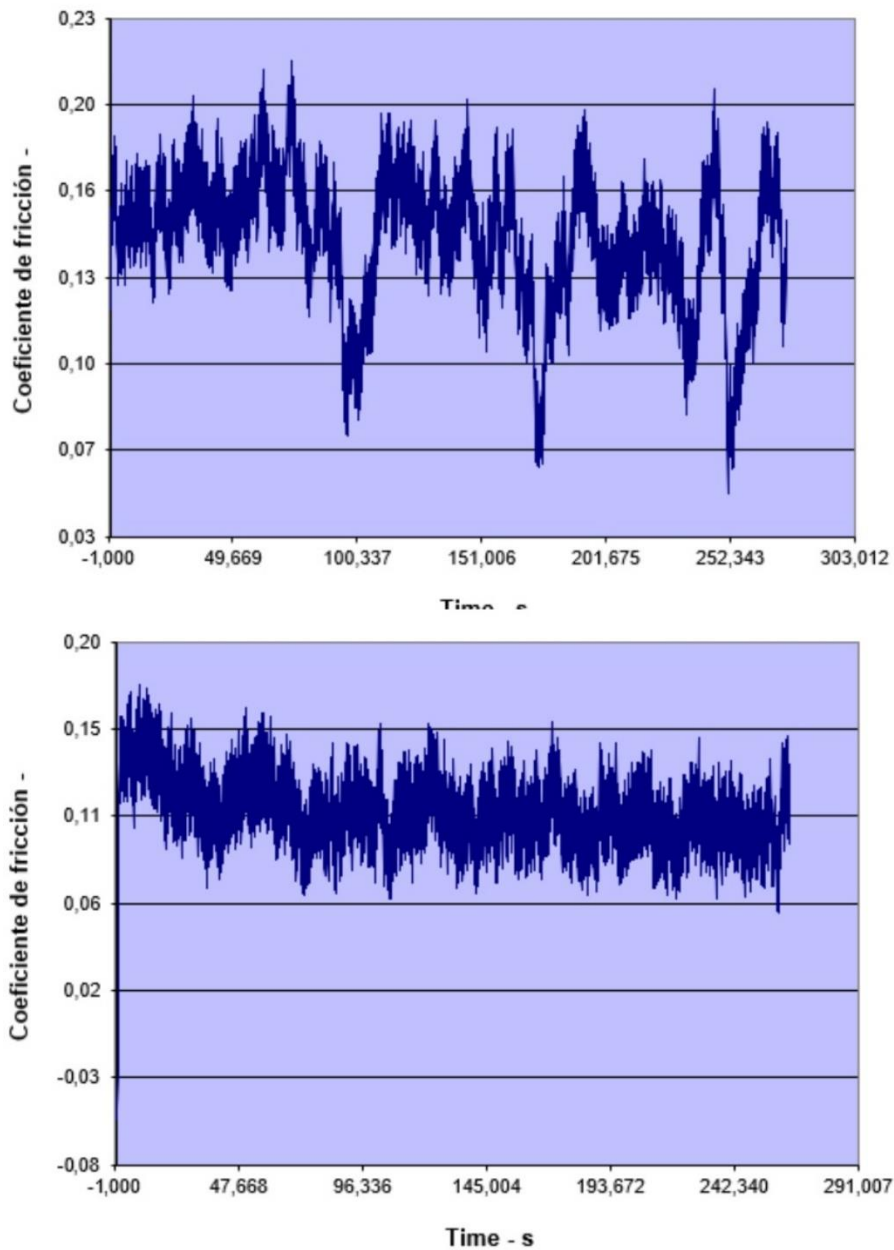


Figura 3.10: evolución del coeficiente de fricción lubricado en probetas texturizadas (arriba) y no texturizadas (abajo)

Se ha observado una mejora en el valor del desgaste y del coeficiente de fricción en promedio en el caso de la probeta con el texturizado lineal con una separación de texturas de 0,8 mm. Este hecho indica que es factible mejorar las propiedades tribológicas de la aleación de aluminio UNS A92924. El mecanismo por el que se produce esta mejora puede ser por el ya conocido efecto de un atrapamiento de partículas abrasivas, así como un posible efecto adicional relacionado con un atrapamiento del material adherido al pin.

No obstante, no se puede validar la hipótesis de una optimización del espesor de capa, ni de facilitar la transición a una lubricación parcial o elastohidrodinámica. Se observa que el mejor resultado para el deslizamiento con lubricación se obtiene para la probeta no texturizada, es decir, en este caso el texturizado entorpece la lubricación, debido a una mayor dispersión de la capa de fluido. Este efecto positivo es más notable con el empleo de superficies concordantes y

presiones de contacto bajas. Tampoco existe certeza en el papel de las texturas como microrreservas de lubricante, debido a su reducida profundidad. Para conseguir este efecto, es importante obtener unas texturas con una profundidad y una forma adecuada. Las texturas generadas en este estudio han podido actuar como tal, aunque con los ensayos realizados no hay indicios suficientes para validar o rechazar la hipótesis. Además, el hecho de haber obtenido una cierta mejora en el desgaste no implica que los patrones de texturas empleados sean óptimos, ya que el margen de mejora es muy pequeño. En la mayor parte de los estudios citados, la diferencia de dureza entre los materiales empleados es inferior a la diferencia de dureza de los materiales empleados en este estudio. Esto, sumado a las altas presiones generadas por la esfera del pin y la poca profundidad de las texturas, provoca una temprana destrucción de las mismas, diluyendo su efecto en comparación a los casos de los estudios citados.

A modo de resumen, las conclusiones que podemos obtener son las siguientes:

- La fricción y el desgaste son dos fenómenos a evitar en el diseño de componentes mecánicos.
- La aleación de aluminio UNS A92924 presenta buenas propiedades mecánicas, incluyendo ligereza, buena relación resistencia-peso y buena resistencia a la fractura y a la corrosión, lo que la hace un buen material para la fabricación de componentes mecánicos ligeros.
- Posee una baja dureza y baja resistencia al desgaste, lo cual obliga a emplear métodos para aumentar su resistencia al desgaste.
- Una posible vía de mejora de la resistencia al desgaste de la aleación UNS A92924 es mediante el texturizado láser. Ha permitido reducir desgaste y coeficiente de fricción significativamente en materiales como el acero y el bronce.
- El texturizado láser es un proceso basado en un mecanizado no convencional, que tiene las bondades de ser un rápido, preciso y ecológico. No obstante, puede provocar tratamientos térmicos indeseados en la pieza.
- La lubricación es uno de los métodos más comunes y efectivos de disminuir la fricción y el desgaste.
- La existencia de una capa de fluido gruesa (lubricación hidrodinámica o elastohidrodinámica) reduce en gran medida el efecto perjudicial de la fricción y el desgaste.
- Existen diversos mecanismos de optimización de las propiedades tribológicas al realizar un texturizado láser, incluyendo un agrandamiento de la capa de fluido, la aportación de lubricante en caso de dispersión de este, y atrapando partículas potencialmente abrasivas generadas durante el deslizamiento, así como las adheridas a la otra superficie. También provocan un adelanto de la transición al régimen de lubricación hidrodinámico. El texturizado láser es capaz de modificar las características superficiales de las aleaciones metálicas, así como de modificar su mojabilidad.
- El texturizado láser es un método válido para la optimización de las propiedades tribológicas de la aleación de aluminio UNS A92024. No obstante, un correcto diseño de las texturas es fundamental para conseguir una optimización de dichas propiedades, ya que también pueden empeorarlas.
- En los ensayos en seco, se produce una mejora sutil del coeficiente de fricción y del desgaste en las probetas texturizadas. Estas mejoras provienen de un atrapamiento de partículas abrasivas y adheridas al pin, que disminuyen la magnitud del desgaste y de las interacciones entre las superficies.

- En los ensayos lubricados, se observa un empeoramiento del coeficiente de fricción y una mejora del desgaste en las probetas texturizadas. Las razones son una dispersión de la capa de fluido, al existir altas presiones de contacto y una geometría que tiende a dispersarla, junto a una disminución del volumen de desgaste adhesivo y abrasivo gracias a las texturas.
- Las texturas rectangulares con una separación de 0,8 mm ofrecen el mejor resultado en el deslizamiento en seco, si bien, no supone una mejora significativa.
- La profundidad es un parámetro importante al generar un patrón de texturas, ya que influye considerablemente en su capacidad para retener partículas abrasivas y potenciar sus efectos beneficiosos.
- El mecanismo de desgaste predominante en los ensayos realizados es la adhesión de aluminio al acero, aunque también se produce desgaste abrasivo en menor medida.
- La diferencia de dureza entre el acero y el aluminio provoca una destrucción temprana de las texturas, reflejada en una tendencia al incremento del coeficiente de fricción en los primeros instantes de los ensayos para las probetas texturizadas. .

Este Trabajo Fin de Grado, no solo ha servido para corroborar la no trivialidad del proceso estudiado. También se han abierto algunos interrogantes respecto a los resultados obtenidos, que dan lugar, entre otras a las siguientes líneas de trabajo futuras:

- Caracterización más exhaustiva de las superficies tras el proceso de texturizado, con el fin de detectar variaciones en su microdureza y una profundidad más exacta de las texturas.
- Creación y ensayo de patrones de texturas basados en la rectangular con una separación inferior a 0,8 mm, con el fin de estudiar una posible tendencia a la mejora del coeficiente de fricción y del desgaste.
- Estudio de la evolución del coeficiente de fricción y del desgaste en ensayos con una duración superior.
- Ensayo de las mismas texturas con el uso de superficies concordantes (ensayos flat-on-disc).
- Estudio de la influencia de la profundidad de las texturas, mediante la realización de texturas con el mismo patrón y distinta profundidad

Capítulo 4 Referencias bibliográficas

1. Tianchang H, Litian H. The study of tribological properties of laser-textured surface of 2024 aluminium alloy under boundary lubrication. *Lubr Sci.* 2012;(24):84–93.
2. Ahuir-Torres JI, Arenas MA, Perrie W, Dearden G, de Damborenea J. Surface texturing of aluminium alloy AA2024-T3 by picosecond laser: Effect on wettability and corrosion properties. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2017;321:279–91. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.056>
3. Allachi H, Chaouket F, Draoui K. Corrosion inhibition of AA6060 aluminium alloy by lanthanide salts in chloride solution. *J Alloys Compd.* 2009;475(1–2):300–3.
4. Salguero J. Análisis, evaluación y propuestas de mejora del rendimiento del Mecanizado de Alta Velocidad de aleaciones de aluminio de interés en la industria aeronáutica. Universidad de Cádiz; 2013.
5. Kalpakjian S, Schmid SR. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* [Internet]. 5ª edición. Pearson Practice Hall; 2008. Available from: www.pearsoneducacion.net/kalpakjian
6. Askeland DR, Fulay PP, Wright WJ. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 6th ed. México D.F: Cengage Learning; 2011.
7. Shackelford JF. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. 6th ed. Madrid: Pearson Practice Hall; 2005.
8. ASM. *ASM Handbook: Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 1992.
9. Zhang X, Chen Y, Hu J. Recent advances in the development of aerospace materials. *Prog Aerosp Sci* [Internet]. 2018;97(August 2017):22–34. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001>
10. Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Mater Des* [Internet]. 2014;56:862–71. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>
11. Hamrock BJ, Jacobson BO, Schmid SR. *Elementos de máquinas*. 2nd ed. México D.F: McGraw-Hill; 2000.
12. Hutchings I, Shipway P. *Friction and Wear of Engineering Materials. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2017.
13. Neale MJ, editor. *Wear mechanisms*. In: *Lubrication and Reliability Handbook*. Butterworth-Heinemann; 2001.
14. Hutchings I, Shipway P. *Sliding wear* [Internet]. 2nd ed. Tribology. Elsevier Ltd.; 2017. 107–164 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00005-2>
15. Tarasov SY, Filippov A V., Kolubaev EA, Kalashnikova TA. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy. *Tribol Int* [Internet]. 2017;115(February):191–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.039>
16. Subramanian C. Wear properties of aluminium-based alloys. In: *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*. 2010. p. 40–57.
17. Mang T, Dresel W. *Lubricants and Lubrication* [Internet]. 2nd ed. Lubricants and

- Lubrication: Second Edition. Elsevier Ltd.; 2007. 1–850 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00004-0>
18. Marghitsu DB, Dupac M. Lubrication and sliding bearings. Mach Compon Anal with MATLAB. 2019;167–90.
 19. Bracco G, Holst B. Surface science techniques. Vol. 51, Springer Series in Surface Sciences. 2013.
 20. AENOR. UNE-EN 828: Adhesivos. Mojabilidad. Determinación por medida del ángulo de contacto y de la tensión superficial crítica de la superficie sólida. Madrid; 2013.
 21. Biolin Scientific. Biolin Scientific: Technical Note - Influence of Surface Roughness on Contact Angle and Wettability. 1936;1–3.
 22. AENOR. UNE-EN ISO 4287. Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial. Madrid; 1999.
 23. Kubiak KJ, Wilson MCT, Mathia TG, Carval P. Wettability versus roughness of engineering surfaces. 2011;271:523–8.
 24. Wojciechowski L, Kubiak KJ, Mathia TG. Roughness and wettability of surfaces in boundary lubricated scuffing wear. Tribol Int [Internet]. 2016;93:593–601. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.013>
 25. Groover MP. Fundamentos de manufactura moderna. 3rd ed. México D.F: McGraw-Hill; 2007.
 26. Bhattacharyya B, Doloi B. Machining processes utilizing thermal energy. Modern Machining Technology. 2020. 161–363 p.
 27. Bhattacharyya B, Doloi B. Micromachining processes. Modern Machining Technology. 2020. 593–673 p.
 28. Piqué A, Chrisey DB, Paul Christensen C. Laser Direct-Write Micromachining. Direct-Write Technol Rapid Prototyp. 2002;(4):385–414.
 29. Ding Q, Wang L, Hu L. Tribology optimization by laser surface texturing: From bulk materials to surface coatings. Laser Surf Eng Process Appl. 2015;405–22.
 30. Mao B, Siddaiah A, Liao Y, Menezes PL. Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review. J Manuf Process [Internet]. 2020;53(February):153–73. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.009>
 31. Yamaguchi K, Takada Y, Tsukuda Y, Ota M, Egashira K, Morita T. Friction Characteristics of Textured Surface Created by Electrical Discharge Machining under Lubrication. Procedia CIRP [Internet]. 2016;42(Isem Xviii):662–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.298>
 32. Sc NKM. Design for Rapid Manufacturing functional SLS parts Walter Kruf M . Sc ., Bart van de Vorst B . Sc ., Hessel Maalderink B . Sc ., 2006;389–94.
 33. Vázquez-Martínez JM, Del Sol I, Batista M, Fernández-Vidal SR, Hernandez PM, Salguero J. Experimental Study of Laser Texturing Processes on the Lubricant Retention of Carbide (WC-Co) Surfaces. Key Eng Mater. 2019;813:55–61.
 34. Galda L, Sep J, Prucnal S. The effect of dimples geometry in the sliding surface on the

- tribological properties under starved lubrication conditions. Tribol Int [Internet]. 2016;99:77–84. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.015>
35. Wang Z, Li YB, Bai F, Wang CW, Zhao QZ. Angle-dependent lubricated tribological properties of stainless steel by femtosecond laser surface texturing. Opt Laser Technol [Internet]. 2016;81:60–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.01.034>
36. Salguero J, Del Sol I, Vazquez-Martinez JM, Schertzer MJ, Iglesias P. Effect of laser parameters on the tribological behavior of Ti6Al4V titanium microtextures under lubricated conditions. Wear [Internet]. 2019;426–427(September 2018):1272–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.029>
37. Li X, Li Y, Tong Z, Ma Q, Ni Y, Dong G. Enhanced lubrication effect of gallium-based liquid metal with laser textured surface. Tribol Int [Internet]. 2019;129:407–15. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.037>
38. Kovalchenko A, Ajayi O, Erdemir A, Fenske G. Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. Wear [Internet]. 2011;271(9–10):1719–25. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.049>
39. Costa HL, Hutchings IM. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. Tribol Int. 2007;40(8):1227–38.
40. Kovalchenko A, Ajayi O, Erdemir A, Fenske G, Etsion I. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. Tribol Int. 2005;38(3):219–25.
41. Galda L, Sep J, Olszewski A, Zochowski T. Experimental investigation into surface texture effect on journal bearings performance. Tribol Int [Internet]. 2019;136(April):372–84. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.073>
42. Henry Y, Bouyer J, Fillon M. Experimental analysis of the hydrodynamic effect during start-up of fixed geometry thrust bearings. Tribol Int [Internet]. 2017; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.021>
43. Tala-ighil N, Fillon M. A numerical investigation of both thermal and texturing surface effects on the journal bearings static characteristics. Tribology International, 90, 228–239. doi:10.1016/j.triboint.2015.02.032. Tribology Int [Internet]. 2015; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.02.032>
44. Galda L, Pawlus P, Sep J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve. Tribol Int [Internet]. 2009;42(10):1505–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2009.06.001>
45. Pawlus P, Galda L, Dzierwa A, Koszela W. Abrasive wear resistance of textured steel rings. Wear. 2009;267:1873–82.
46. Lu X, Khonsari MM. An experimental investigation of dimple effect on the stribeck curve of journal bearings. Tribol Lett. 2007;27(2):169–76.
47. Koszela W, Dzierwa A, Galda L, Pawlus P. Experimental investigation of oil pockets effect on abrasive wear resistance. Tribol Int [Internet]. 2012;46(1):145–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.05.001>
48. Saeidi F, Meylan B, Hoffmann P, Wasmer K. Effect of surface texturing on cast iron reciprocating against steel under starved lubrication conditions: A parametric study.

- Wear. 2016;348–349:17–26.
49. Braun D, Greiner C, Schneider J, Gumbsch P. Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication. *Tribol Int*. 2014;77:142–7.
 50. Vilhena LM, Podgornik B, Vižintin J, Možina J. Influence of texturing parameters and contact conditions on tribological behaviour of laser textured surfaces. *Meccanica*. 2011;46(3):567–75.
 51. Qiu Y, Khonsari MM. Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings. *Tribol Int* [Internet]. 2011;44(5):635–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.01.003>
 52. Zenebe Segu D, Hwang P. Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test. *Tribol Int* [Internet]. 2015;91:111–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.028>
 53. ASTM International. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus G99-17. *Annu B ASTM Stand*. 2017;05(2016):1–6.
 54. ASM. *ASM Handbook: volume 18. Friction, Lubrication and Wear Technology*. 1992.